

ბ. ნ. პეტროვი, ნ. ვ. ბოროხოვი, ფ. ა. ბორიანიოვი,
მ. ვ. ლიპკოვსკი, ე. ვ. ნიტუსოვი, პ. ს. სერბევი

ეღექტრუდი მანქანები

შესავალი. ცვლადი დენის მანქანების საერთო
საკითხები. ანიერონული მანქანები

პროფ. ბ. ნ. პეტროვის რედაქციით

წინასიტყვაობა

ელექტრომანქანების სახელმძღვანელო პროფ. გ. ნ. პეტროვის რედაქტორობით წარმოადგენს მოსკოვის ენერგეტიკული ინსტიტუტის ელექტრული მანქანების კათედრის სერგოზულ ნაშრომს. წიგნის რუსული გამოცემა შეიცავს ორ ნაწილს. პირველ ნაწილში მოცემულია: ტრანსფორმატორები, ცვლადი დენის მანქანების საერთო საკითხები, ასინქრონული და სინქრონული მანქანები, ხოლო მეორე ნაწილში მუდმივი და ცვლადი დენის კოლექტორული მანქანები.

აღნიშნული სახელმძღვანელო განკუთვნილია ელექტროტექნიკური და ელექტრომექანიკური სპეციალობის სტუდენტობისათვის. ჩვენი აზრით ეს წიგნი ერთ-ერთი სტაბილური სახელმძღვანელოა და ის დიდ დახმარებას გაუწევს არა მარტო სტუდენტობას, არამედ ელექტროინჟინერების დიდ ნაწილს, რომლებსაც პრაქტიკული მუშაობის პროცესში უხდებათ ელექტრომანქანების თეორიის ღრმად შესწავლა.

წინამდებარე თარგმანი მოიცავს რუსული გამოცემის პირველ ნაწილს სინქრონული მანქანების გარეშე. გარდა ამისა, თარგმნის დროს ჩვენ მიზანშეწონილად ვცანით გამოგვეტოვებინა მაგნიტური წრედის ანგარიში და ზოგიერთი ცხობები ასინქრონული ძრავის კონსტრუქციის შესახებ. პირველი გადატანილია მუდმივი დენის მანქანების კურსში რომლის შესწავლაც ჩვეულებრივად წინ უძღვის ცვლადი დენის მანქანების შესწავლას. რაც შეეხება კონსტრუქციული სახის ცნობებს, მათ სტუდენტი დებულობს ასინქრონული ძრავის გეგმარების შესრულების დროს, რომელიც, როგორც ცნობილია, სავალდებულოა ზემოაღნიშნული სპეციალობებისათვის.

საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტის ელექტრომანქანების კათედრას განზრახული აქვს უმოკლეს ხანში სინქრონული მანქანების კურსის თარგმნის ცალკე წიგნად გამოშვება, რომელიც ამ წიგნთან ერთად ნაწილობრივ შეავსებს არსებულ ბარვეზს ქართულ ენაზე ტექნიკური სახელმძღვანელოების შექმნის საქმეში.

მთარგმნელი

I. შესავალი

I. ელექტრული მანქანები და მათი დანიშნულება

ა) ელექტრული მანქანების ძირითადი კლასიფიკაცია. ელექტრული მანქანა წარმოადგენს ყოველი ენერგეტიკული დანადგარის ერთ-ერთ ძირითად ელემენტს.

ელექტროენერჯის წარმოების დროს, საწვავის, წყლის ან ქარის ენერჯიას გარდაქმნიან ტურბინების, დგუშისებური ან ქარის ძრავების საშუალებით, ბრუნვითი მოძრაობის მექანიკურ ენერჯიად, უქანასკნელს კი ელექტრულ ენერჯიად.

ბრუნვითი მოძრაობის მექანიკური ენერჯიის გარდაქმნა ელექტრულ ენერჯიად განხორციელდება ელექტრული მანქანების საშუალებით, რომლებსაც ელექტრული დენის გენერატორებს უწოდებენ.

თანამედროვე ელექტროდანადგარებში ენერჯიის განაწილება დაკავშირებულია მის დიდ მანძილებზე გადაცემასთან, მისი გამომუშავების ადგილებიდან — გამოყენების ადგილებამდე: იმისათვის, რომ ელექტრული ენერჯიის გადაცემა უფრო ეკონომიური იყოს და არ მოითხოვოს გამტარებისათვის მასალების მნიშვნელოვანი ხარჯი, გენერატორის მიერ გამომუშავებულ შედარებით დაბალი ძაბვის ელექტრულ დენს, გარდაქმნიან მაღალი ძაბვის დენად. უქანასკნელი იძლევა ელექტროგადამცემი ხაზის გამტარების კვეთის შემცირების საშუალებას, და უფრო ეკონომიურს ხდის ენერჯიის გადაცემას. დაბალი ძაბვის დენის გარდაქმნა მაღალი ძაბვის დენად და, პირიქით, ხორციელდება არამბრუნავი ელექტრული მანქანების (აპარატების) საშუალებით, რომლებსაც ტრანსფორმატორები ეწოდება.

ელექტრული ენერჯიის მოხმარება უმეტეს შემთხვევაში დაკავშირებულია მის ბრუნვითი ან წინსვლით — უკუქცევითი მოძრაობის (სხვადასხვაგვარი მანქანები, მექანიზმები და დაზგები) მექანიკურ ენერჯიად გარდაქმნასთან.

ეს გარდაქმნა ელექტრული ენერჯიისა მექანიკურად, ხორციელდება ელექტრული მანქანების საშუალებით, რომლებსაც ელექტრული ძრავები ან უმოტორები ეწოდება.

თანამედროვე ელექტრულ დანადგარებში ელექტრული ენერჯიის რაციონალური გამოყენება ხშირად დაკავშირებულია ერთი სახის ელექტრული ენერჯიის მეორეში გარდაქმნის აუცილებლობასთან, მაგ. ცვლადი დენის მუდმი-

ვად, სამფაზა დენის ორფაზად და ა. შ. ერთი სახის ელექტრული დენის გარდაქმნა მეორეში აგრეთვე ხორციელდება ელექტრული მანქანების საშუალებით, რომლებსაც ელექტრული დენის გარდამსახები ეწოდება.

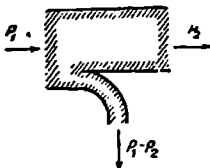
ელექტრული დანადგარის დენის სისტემის მიხედვით ელექტრული მანქანები (გენერატორები, ძრავები, გარდამსახები) შეიძლება განკუთვნილ იქნას ცვლად ან მუდმივ დენზე მუშაობისათვის. ამის მიხედვით ისინი იყოფიან ცვლადი და მუდმივი დენის მანქანებად.

უკანასკნელ ხანებში გავრცელებას პოულობს იონური გარდამსახები ელექტრულ მანქანებთან ერთობლივ მუშაობაში. ამ დროს ელექტრული მანქანები იძენენ ახალ ფასეულ თვისებებს, რომლებიც აუმჯობესებენ ელექტრული ენერჯიის გარდაქმნას და მოხმარებას.

ელექტრული მანქანების კურსის ამოცანას წარმოადგენს სხვადასხვა ტიპის ელექტრული მანქანების თვისებებისა და მათი კონსტრუქციული შესრულების ძირითადი ფორმების შესწავლა.

ბ) ელექტრული მანქანების საერთო ენერგეტიკული სქემა. ყველა ელექტრულ მანქანას აქვს საერთო ენერგეტიკული სქემა. ეს სქემა წარმოდგენილია ნახ. 1-ზე.

მანქანასთან d_1 დროის განმავლობაში მიყვანილი ენერჯია $P_1 dt$, მასში გარდაიქმნება ენერჯიად $P_2 dt$, ამავე დროს ენერჯიის მუდმივობის კანონის შესაბამისად $P_3 < P_1$, ვინაიდან მანქანის მუშაობის დროს ადგილი აქვს მასში გარდასაქმნელი ენერჯიის დაკარგვას. ეს დანაკარგი ტოლი $(P_1 - P_2) dt_2$ არ გამოიყენება მანქანაში და იფანტება სითბოს სახით, ახურებს რა მის ცალკეულ ნაწილებს.



ნახ. 1.

ელექტრული მანქანის მუშაობის დროს ენერჯიის დანაკარგები შედგება: 1) ჯოულის დანაკარგებისაგან, რომლებიც გამოწვეულია გრაფიკულ მუშაობის დენების მიერ და ცვლად მაგნიტურ არეში მოთაყსებულ მანქანის ცალკეულ ნაწილებში აღძრული გრივლური დენებისაგან, 2) ჰისტერეზისზე დანაკარგებისაგან, მანქანის ფერომაგნიტურ ნაწილებში, რომლებიც ვადამაგნიტდებიან, 3) შექანიური დანაკარგებისაგან ხახუნზე საკისრებში და ჰაერთან, და 4) მაღალი ძაბვის მანქანებში დამატებით დიელექტრიკული დანაკარგებისაგან იზოლაციაში.

ელექტრულ მანქანებში ენერჯიის დანაკარგების არსებობა, რაც იწვევს მათი ცალკეული ნაწილების გახურებას, გვაიძულებს განსაკუთრებული ყურადღება მივაქციოთ მანქანის ყველა ნაწილის წესიერ და თანაბარ გაცივებას. ეს მით უფრო მნიშვნელოვანია, რომ მანქანების კონსტრუქციებში უარყოფითად გამოყენებული საიზოლაციო მასალები ხშირად არასაკმარისად სითბომდგრა-ლია და ადვილად იშლება $100^{\circ}C$ და უფრო მაღალი ტემპერატურის ზემოქმედების დროს.

ელექტრული მანქანის დანიშნულების მიხედვით P_1 მიყვანილ და P_2 გაცემულ სიმძლავრეებს აქვთ შემდეგი ბუნება:

ელექტრული მანქანის გვარობა	სიმძლავრეები	
	P_1	P_2
1. გენერატორი	მექანიკური	ელექტრული
2. ძრავი	ელექტრული	მექანიკური
3. გარდამსახი და ტრანს- ფორმატორი	ელექტრული	ელექტრული

ფარდობას $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ ეწოდება მანქანის მარჯი ქმედების კოეფი-

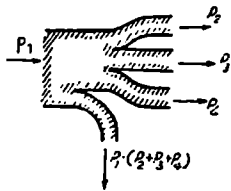
ციენტი (შემოკლებულად მ. ქ. კ.) და გამოისახება პროცენტებში ან ერთეულის ნაწილებში. თანამედროვე ელექტრულ მანქანებში, მუშაობის დროს ენერჯიის დანაკარგები შედარებით არ არის დიდი და მათი მ. ქ. კ. მაღალია, მანქანის სიმძლავრის მიხედვით მ. ქ. კ. იცვლება ზღვრებში $80 \div 99,5\%$, სადაც ქვედა ზღვარი შეესაბამება მცირე სიმძლავრის მანქანებს. ძალიან მცირე სიმძლავრის მანქანებშიაც კი (გაიზომებიან ათეული ვატებით) მ. ქ. კ. არ არის $30 \div 50\%$ -ზე ნაკლები.

დიდი სიმძლავრის ელექტრული მანქანა წარმოადგენს ენერჯიის ფრიად სრულყოფილ გარდაქმნელს, დანაკარგები მასში გაიზომება პროცენტის ნაწილებში.

ზოგიერთ შემთხვევებში ელექტრულ მანქანასთან მიყვანილი ენერჯია $P_1 dt$ გარდაიქმნება ერთდროულად სხვადასხვა სახის ენერჯიად: $P_2 dt$, $P_3 dt$, $P_4 dt$, მაგალითად, სხვადასხვა ძაბვების დენების ენერჯიად და ა. შ. (ნახ. 2).

სიმძლავრე, რომელზედაც გათვლილია ელექტრული მანქანა, ნაჩვენებია მანქანაზე მიმაგრებულ ფირფიტაზე, და ეწოდება ნომინალური.

ფირფიტაზე ნაჩვენები ყველა სხვა სიდიდეები, რომლებიც ახასიათებენ მანქანის მუშაობას ნომინალურ სიმძლავრის დროს, აგრეთვე ატარებენ ნომინალურის სახელწოდებას, მაგალითად, ნომინალური დენი, ნომინალური ძაბვა და ა. შ.



ნახ. 2.

ზვიად, მანქანის მუშაობის დამახასიათებელი სიდიდეები, მაგალითად, დენი, ძაბვა, სიმძლავრე, ბრუნვის სიჩქარე, წინააღმდეგობა და სხვა, გამოისახებიან ფარდობით ერთეულებში, ე. ი. ნაწილებში, მათი ნომინალური მნიშვნელობების ან მნიშვნელობების, რომლებიც პირობითად მიღებულია ერთის ტოლად. ფარდობითი ერთეულები აღინიშნებიან ასოებით n/c , მაგალითად $U=1,1n/c$ ნიშნავს, რომ ძაბვა U ტოლია თავისი ნომინალური მნიშვნელობის $1,1$ -ის. ფარდობითი ერთეულების სისტემას პრაქტიკული გაანგარიშების დროს ზოგიერთ შემთხვევაში აქვს უპირატესობა. ამ სისტემამ განსაკუთრებით ფართო გავრცელება ჰპოვა ა. შ. შ-ში.

2. ელექტროდინამიკის ძირითადი კანონები გამოყენებული ელექტრული მანქანების მიმართ

ყოველი ელექტრული მანქანის მუშაობა ემყარება ელექტროდინამიკის სამ კანონს:

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონს, რომელიც განსაზღვრავს ელექტრომაგნიტური ძალების აღძვრას მანქანის გრაგნილებში.

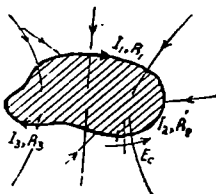
სრული დენის კანონს, რომელიც განსაზღვრავს მაგნიტური არეს განაწილებას მანქანაში და ელექტრომაგნიტური ძალების კანონს, რომელიც განსაზღვრავს მანქანის ნაწილების მექანიკურ ურთიერთქმედებას და მათ ფარდობით გადასაცვლებას.

ქვემოთ ჩვენ განვიხილავთ ამ კანონებს გამოყენებულს ელექტრული მანქანების მიმართ.

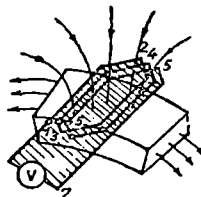
ა) ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი: ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი თანამედროვე თვალსაზრისით შეიძლება გამოსახული იქნას შემდეგი ფორმულით.

$$\oint (\vec{E} - \vec{E}_c) d\vec{l} = - \frac{d\psi}{dt}, \quad (2,1)$$

სადაც \vec{E} —ელექტრული არეს დაძაბულობის ვექტორია, E_c —გარე წარმოშობის (ქიმიურის, თერმულის, ან კონტაქტურის) ელექტრული არეს დაძაბულობის



ნახ. 3.



ნახ. 4.

ვექტორია, dl —ინტეგრაციის ჩაკეტილი კონტურის ელემენტი, ψ —ინტეგრაციის კონტურიან ნაკადშებმების რიცხვია, z —დრო.

ტოლობა (2,1) შეიძლება ფორმულირებულ იქნას შემდეგნაირად: შეკრულ კონტურზე შემოვლის ელექტრული ძაბვა ტოლია, ამ კონტურთან ნაკადშებმების დროის მიხედვით ცვლილების სიჩქარისა. თუ მაგნიტური ნაკადს და ψ ნაკადშებმას გამოვსახავთ ვებერებში (ვოლტწამებში) შაშინ (2,1)-ს თანახმად შემოვლის ძაბვა გამოსახული იქნება ვოლტებში. თუ ნაკადშებმა გამოსახულია მაქსველებში (2,1), ტოლობის მარჯვენა ნაწილში უნდა შევიტანოთ მამრავლი 10^{-8} .

ელექტრულ მანქანებში უფრო ხშირად გვიხდება გამტარებისაგან შემდგარი შეკრული კონტურების განხილვა, რომლებიც პირველ მიახლოებით შეიძლება განხილულ იქნან როგორც ხაზოვანი, ე. ი. ისეთნაირნი, რომლებ-

შიც გამტარის კვეთი მცირეა კონტურის ფართობთან შედარებით (ნახ. 3). ამ შემთხვევაში ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი შეიძლება ჩაწერილ იქნას შემდეგი სახით:

$$\oint (\bar{E} - \bar{E}_e) \bar{dl} = \oint \bar{E} \bar{dl} - \oint \bar{E}_e \bar{dl} = \oint \rho \Delta dl - \Sigma E_e = \\ = \oint \rho \frac{l}{s} dl - \Sigma E_e = \Sigma IR - \Sigma E_e = - \frac{d\Psi}{dt}. \quad (2,2)$$

აქ ρ —გამტარის ხვედრითი წინააღმდეგობაა, Δ —დენის სიმკვრივე I —დენი, s —გამტარის კვეთი, E_e —გარე წარმოშობის ე. მ. ძ. R —გამტარის წინააღმდეგობა კონტურის მოცემულ სიგრძეზე.

ამრიგად, ხაზოვანი გამტარებისაგან შემდგარი შეკრული კონტურისათვის, ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი შეიძლება ფორმულირებულ იქნას შემდეგნაირად: ძაბვის ვარდნა ჩაკეტილი გამტარის გასწვრივ, ΣIR . ტოლია გამტარის კონტურთან ნაკადშებმების რიცხვის დროის მიხედვით პირველი წარმოებულისა— $-\frac{d\Psi}{dt}$ —და კონტურში მოქმედი ΣE_e გარე წარმოშობის ე. მ. ძ-ის ჯამის (ნახ. 3).

$$\Sigma IR = - \frac{d\Psi}{dt} + \Sigma E_e. \quad (2,3)$$

როგორც ამ ტოლობიდან ჩანს, სიდიდე $-\frac{d\Psi}{dt}$ შეიძლება ფორმალურად განვიხილოთ, როგორც ჩაკეტილ კონტურში გარე ე. მ. ძ. ΣE_e -ს მსგავსად მოქმედი რაღაც ე. მ. ძ.. აზიტომ მას უწოდებენ და ინდუქტიურ ე. მ. ძ-ს ადძრულ ე. მ. ძ-ს:

$$-\frac{d\Psi}{dt} = \epsilon. \quad (2,4)$$

ამგვარად, (2,3)-ს ნაკვირვად შეგვიძლია დაწეროთ:

$$\Sigma IR = \epsilon + \Sigma E_e. \quad (2,5)$$

დაინდუქტირებული ე. მ. ძ. შეიძლება აღიძრას, როგორც უძრავ ჩაკეტილ კონტურში მასთან შემხული მაგნიტური ნაკადის დროის მიხედვით ცვალებადობისას, ასევე მაგნიტურ არეში კონტურის მოძრაობისას, თუ მაგნიტური ნაკადი ჩაკეტილ კონტურის შიგნით მოძრაობის დროს იცვლება.

ზოგად შემთხვევაში შეიძლება აღვიღოთ ქონდეს ნაკადშებმის ცვლილების ორივე სახეს:

$$d\Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial t} dt + \frac{\partial \Psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \Psi}{\partial x} dx.$$

მაშინ აღძრული ე. მ. ძ. ტოლი იქნება

$$\epsilon = - \frac{d\Psi}{dt} = - \left(\frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right).$$

შემოგვაქვს რა არეში კონტურის მოძრაობის ფარდობითი სიჩქარის აღნიშვნა $v = \frac{dx}{dt}$, მივიღებთ

$$\epsilon = - \left(\frac{\partial \Psi'}{\partial t} + v \frac{\partial \Psi'}{\partial x} \right). \quad (2,6)$$

ამ ტოლობის მარჯვენა ნაწილის პირველი წევრი წარმოადგენს პულსაციის ან ტრანსფორმაციის ე. მ. დ.-ს (უძრაობის ე. მ. დ.). მეორე წევრი—მოძრაობის ან ბრუნვის ე. მ. დ.-ს. ტრანსფორმატორებში გვხვდება მხოლოდ ტრანსფორმაციის ე. მ. დ. ელექტრულ მანქანებში კი, უმთავრესად მოძრაობის ე. მ. დ. ხოლო ზოგიერთ შემთხვევებში ტრანსფორმაციის ე. მ. დ.-ც.

კონტურში დანიღუქტირებული ე. მ. დ.-ს მიმართულება ყოველთვის ისეთია, რომ იგი ცდილობს კონტურში შექმნას დენი, რომელიც ეწინააღმდეგება მასთან შებუღი მაგნიტური ნაკადის ცვლილებას.

ელექტრულ მანქანებში, გამტარების ჩაკეტილ კონტურებს ჩვეულებრივად აქვს რთული ფორმა ქმნიან რა მიმდევრობით შეერთებულ ხვევებს, რომელთა ცალკეული ნაწილები მოთავსებულია სხვადასხვა სიბრტყეებში (ნახ. 4).

ამ შემთხვევაში საერთო, რთულ ჩაკეტილ კონტურს, ნებისმიერად ყოფენ მთელ რიგ მარტივ ჩაკეტილ კონტურებად, რომელთათვის მათთან შებუღი მაგნიტური ნაკადის გამოთვლა არ წარმოადგენს სიძნელეს. ასე. მაგალითად: ნახ. 4-ს შემთხვევაში მივიღებთ:

$$\begin{array}{lll} \text{კონტურთან } 1-2-3-1 \text{ შებუღულია ნაკადი } \varphi_1 \\ \phantom{\text{კონტურთან }} 3-4-5-3 \phantom{\text{ შებუღულია }} & \text{''} & \varphi_2 \\ \phantom{\text{კონტურთან }} \phantom{\text{ შებუღულია }} & \text{''} & \varphi_3 \end{array}$$

მთელ ჩაკეტილ კონტურთან ნაკადშებების საერთო რიცხვი Ψ' ტოლი იქნება:

$$\Psi' = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = \sum_1^3 \varphi_n, \quad (2,7)$$

ხოლო ამ კონტურში აღძრული ე. მ. დ.:

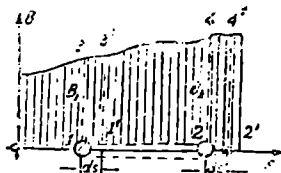
$$\epsilon = - \frac{d\Psi'}{dt} = - \sum_1^3 \frac{d\varphi_n}{dt} \quad (2,8)$$

თუ $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \dots = \varphi_n = \varphi$, როგორც ეს ხშირადაა ელექტრულ მანქანებში, მაშინ

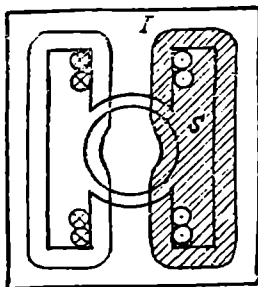
$$\epsilon = - w \frac{d\varphi}{dt} \quad (2,9)$$

ზოგიერთ კერძო შემთხვევებში ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი გამოყენებული ელექტრული მანქანებისათვის, უფრო მოსახერხებელია ფორმულირებულ იქნას სხვა სახით, ვიდრე ამას გვაძლევს ტოლობა (2,8).

განვიხილოთ სწორკუთხა ჩაკეტილი ხვევი, რომელიც განიციდის გადაადგილებას მაგნიტურ არეში. B ინდუქციის ვექტორის, ხვევის მოძრაობის სიბრტყისადმი, პერპენდიკულარული მდგენელის განაწილება სივრცეში შეიძლება იყოს ნებისმიერი (ნახ. 5). ხვევის სიგრძე მისი მოძრაობის პერპენდიკულარული მიმართულებით, მივიღოთ l -ს ტოლად და დავუთ ხვევის ფართობი ამ მიმართულებით ელემენტარულ ფართებად სიგრძით dl როგორც ნახ. 5-დან ჩანს ხვევის dl დროის ვანმავლობაში ds -ზე გადაადგილებისას მაგნიტური



ნახ. 5.



ნახ. 6.

ნაკადის ცვლებადობა ელემენტარული ფართის შიგნით ტოლი იქნება (ფართი $1'3'4'2'$ —ფართი 1342) $dl = (B_2 - B_1) ds dl$ და ამიტომ ამ ფართისათვის

$$-\frac{d\varphi}{dt} = (B_1 - B_2) \frac{ds}{dt} dl,$$

ხოლო მთელი ხვევისათვის

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = v \int_0^l (B_1 - B_2) dl, \quad (2,10)$$

სადაც $v = \frac{ds}{dt}$ — ხვევის მოძრაობის სიჩქარეა.

(2,10)-ს მაგიერად შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\epsilon = v \int_0^l B_1 dl - v \int_0^l B_2 dl = B_{1cp} v l - B_{2cp} v l \quad (2,11)$$

და ჩავთვალოთ, რომ ხვევის ორი „აქტიური“ მხარიდან, ყოველში, რომელიც გადაკვეთს არეს ინდუქციურ ხაზებს, თითქოს აღიძვრება ე. მ. ძ. ტოლი აქტიური მხარის l სიგრძის ნამრავლისა მისი მოძრაობის v სიჩქარეზე და სიგრძის მიმართულებით B_{cp} საშუალო მნიშ-

ვნელობაზე, რომელიც ნორმალურია ინდუქციის ვექტორის მდგენელის მოძრაობის სიბრტყისადმი:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= B_{1cp}l, \\ \epsilon_2 &= B_{2cp}l, \\ \epsilon &= \epsilon_1 - \epsilon_2. \end{aligned} \quad (2,12)$$

ამ ე. მ. დ. მიმართულება განისაზღვრება მარჯვენა ხელის წესით.

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის გამოსახვის ასეთი ფორმა, ხშირად უფრო მოსახერხებელია ე. მ. დ. გამოსათვლელად სწორხაზოვანი მხარეების მქონე ხვევებში.

ბ) სრული დენის კანონი. ამ კანონის თანახმად მაგნიტური არეს დაძაბულობის ინტეგრალი (შემოვლის მაგნიტური ძაბვა) ნებისმიერ შეკრულ კონტურზე ტოლია ამ კონტურის შიგნით გამავალ სრული დენი:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H dl \cos(\vec{H}, d\vec{l}) = \Theta \quad (2,13)$$

სრული დენი

$$\Theta = \int_s \vec{A} \cdot d\vec{s} \int \Delta_n ds \quad (2,14)$$

ტოლია შეკრული კონტურით შემოფარგლულ მთელ ზედაპირზე აღებული დენის სიმკვრივის ვექტორის ნორმალური Δ_n მდგენელის ინტეგრალის. შემდგომში ჩვენ სრულ დენს ვუწოდებთ აგრეთვე დამამაგნიტებელ ძალას და სიმოკლისათვის აღნიშნავენ ასოებით დამ. ძ¹.

თუ მაგნიტური არეს H დაძაბულობას ვაგზომავეთ A/cm , მაშინ სრული დენი უნდა გაიზომოს A -ბში. არეს დაძაბულობის ერსტედებში (Oe) ვაზომვისას, (2,13) ტოლობის მარჯვენა ნაწილში უნდა შევიტანოთ მამრაველი $0,4\pi = 1,256$.

ელექტრულ მანქანებში (ნახ. 6), ხშირად სრული დენი შედგება რამდენიმე ხვევის ან გამტარის ურთიერთ ტოლი დენებისაგან, და ამიტომ მას გამოსახვენ ამპერგამტარებში ან ამპერხვევებში. ასე, მაგალითად, ნახ. 6-ზე ინტეგრირების S დაშტრახულ კონტურის შიგნით გადის ოთხი გამტარი (ხვევი), რომლებშიც მიმდინარეობს დენი I , ამიტომ სრული დენი ამ კონტურის შიგნით ტოლია $4I$ ამპერგამტარის (ან 4 ამპერხვევის).

თუ ინტეგრირების კონტურად ამორჩეულია ინდუქციური ხაზი, მაშინ \vec{H} და $d\vec{l}$ მიმართულებით თანხედენილია და სრული დენის კანონი იღებს სახეს

$$\oint H dl = \Theta \quad (2,15)$$

მოცემულ სრულ დენთან შებმულ ინდუქციური ხაზის მიმართულება განისაზღვრება ბურლის წესით.

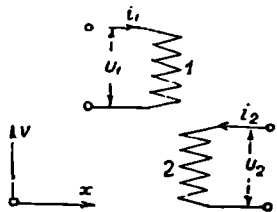
¹. ხანდახან ე. მ. დ-თან ფორმალური ანალოგიის საფუძველზე სრულ დენს C -ს უწოდებენ მაგნიტომაგნიტურ ძალას და სიმოკლისათვის აღნიშნავენ მ. მ. დ.

გ) ელექტრომაგნიტური ძალების კანონი. ყოველ ელექტრულ მანქანაში ჩვეულებრივად გვაქვს ორი ან რამდენიმე გრაგნილი, რომლებშიც მუშაობის დროს გადის დენი. გრაგნილები განლაგებულია როგორც მანქანის უძრავ ნაწილზე—სტატორზე, ასევე მბრუნავზე—როტორზე. გრაგნილებს შორის მაგნიტური კავშირის გასაძლიერებლად სტატორი და როტორი კეთდება ფერომაგნიტური მასალისაგან. ელექტრომაგნიტური ძალების ზეგავლენით მანქანის გრაგნილები ურთიერთქმედებენ მექანიკურად. ამავე დროს როტორზე განლაგებულ გრაგნილებს, შეუძლიათ როტორთან ერთად გადაადგილება. ელექტრომაგნიტური ძალების ზეგავლენით გრაგნილების ურთიერთ—გადაადგილება, გამოყენებულია ელექტრო ძრავებში სასარგებლო მუშაობის შესასრულებლად. ო

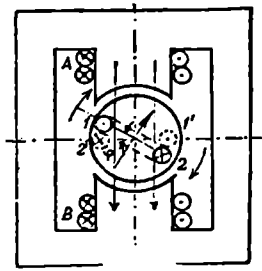
დავუშვათ, რომ გვაქვს ორი გრაგნილი (ნახ. 7), რომლებშიც გადის განსახილველი დროის შუალედში უცვლელი სიდიდის დენები i_1 და i_2 . მთელი სისტემის საერთო მაგნიტური ენერგია ტოლი იქნება

$$W = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M_{12} i_1 i_2, \quad (2,16)$$

სადაც L_1 , L_2 და M_{12} —შესაბამისად გრაგნილების ინდუქტიობა და ურთიერთ-



ნახ. 7.



ნახ. 8.

ინდუქტიობაა. დავუშვათ, რომ გრაგნილი 1 დამაგრებულია უძრავად, ხოლო გრაგნილი 2-ს შეუძლია თავისუფლად გადაადგილება. განვიხილოთ გრაგნილი 2-ზე მოქმედი ელექტრომაგნიტური ძალები. ვიპოვოთ ამ ძალის F_x მდგენელი x ღერძის გასწვრივ. დავუშვათ, რომ x ღერძის დადებით მხარეს მიმართული F_x ძალის ზეგავლენით, გრაგნილი 2 dt დროის განმავლობაში გადაადგილდა dx -ზე. ამ დროს შესრულდება მუშაობა

$$dA = F_x dx \quad (2,17)$$

და ურთიერთინდუქტიობის შეცვლის ხარჯზე შეიცვლება მთელი სისტემის მაგნიტური ენერგია

$$dW = i_1 i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial x} dx. \quad (2,18)$$

ცხადია, რომ მექანიკური მუშაობა და მაგნიტური ენერჯიის შეცვლა შეიძლება მოხდეს მხოლოდ ელექტრული ენერჯიის ხარჯზე, რომელიც მიღებულია dt დროის განმავლობაში გრაგნილების მკვებავ დენის წყაროებიდან. ელექტრული ენერჯიის ნაწილი ამ დროს დაიხარჯება ჯოულის დანაკარგებზე გრაგნილებში.

ამიტომ შეგვიძლია დავწეროთ

$$dA + dW = (i_1 u_1 + i_2 u_2 - i_1^2 r_1 - i_1^2 r_2) dt, \quad (2,19)$$

სადაც r_1 და r_2 — გრაგნილების წინააღმდეგობებია.

გრაგნილი 2-ის ax -ზე გადაადგილებისას i_1 და i_2 დენები რჩებიან უცვლელნი, ამიტომ გრაგნილებში აღიძვრება ე. მ. ძ. მხოლოდ ურთიერთინდუქტიობის M_{12} -ს შეცვლის ხარჯზე;

$$e_1 = -i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad e_2 = -i_1 \frac{\partial M_{12}}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt}. \quad (2,20)$$

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ

$$u_1 = i_1 r_1 - e_1, \quad u_2 = i_2 r_2 - e_2,$$

მაშინ, ტოლობა (2,19)-ში ამ მნიშვნელობების ჩასმის შემდეგ მივიღებთ:

$$dA + dW = - (e_1 i_1 + e_2 i_2) dt \quad (2,21)$$

ან (2,17), (2,18) და (2,20)-ს. თანახმად

$$F_x dx + i_1 i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial x} dx = 2i_1 i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial x} dx,$$

საიდანაც

$$F_x = i_1 i_2 \frac{\partial M_{12}}{\partial x} = \frac{dW}{dx}. \quad (2,22)$$

ეს გამოსახვა, რომელიც განსაზღვრავს ელექტრომაგნიტური ძალების კანონს, გვაჩვენებს, რომ როდესაც

$$F_x dx > 0 \text{ ყოველთვის } dW > 0.$$

აქედან გამომდინარეობს, რომ ელექტრომაგნიტური ძალები მიმართული არიან ისე, რომ ისინი მიისწრაფვიან გაზარდონ სისტემის მაგნიტური ენერჯია.

განვიხილოთ ორი უძრავი A და B კოქებისაგან შემდგარი სისტემა (ნახ. 8.) რომელთა დამამაგნიტებელი ძალები მიმართულებით თანხედნენ არიან. მათ შორის მოთავსებულია მოძრავი კოქა 1—2. ცხადია, რომ სისტემის მაგნიტური ენერჯია მაქსიმალური იქნება მაშინ, როდესაც მოძრავი კოქა დაამაგნიტებს იმავე მიმართულებით, რა მიმართულებითაც A და B კოქები. აქედან გამომდინარეობს, რომ ელექტრომაგნიტური ძალები, მოქმედებენ რა მოძრავ კოქაზე, ეცდებიან შემოაბრუნონ იგი უმოკლესი გზით 1—2 მდგომარეობიდან, 1'—2' მდგომარეობაში.

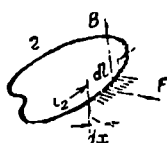
განესაზღვროთ, მოძრავი კოქის გამტარებზე მოქმედი ბრუნვის მომენტი-

dx -ს მიმართულებად ავირჩიოთ მხების მიმართულება წრეხაზისადმი, რომლითაც მოძრაობს კოქას გვერდები, მაშინ $dx = r dp$ (ნახ. 8), სადაც r — წრეხაზის რადიუსია; ამიტომ (2.22)-ის თანახმად

$$J \cdot r = \frac{dW}{d\varphi} \quad (2,23)$$

ეს ტოლობა გვიჩვენებს, რომ გამტარზე მოქმედი ბრუნვის მომენტი ტოლია მაგნიტური არეს ენერჯიის პირველი წარმოებულისა მობრუნების კუთხით.

პრაქტიკაში, ანგარიშის დროს ხშირად უფრო მოსახერხებელია ვისარგებლოთ ელექტრომაგნიტური ძალების კანონის სხვა ფორმულირებით.



ნახ. 9.



ნახ. 10.

დავუშვათ, რომ ჩვენ გვაქვს ორი კონტური დენით (ნახ. 9) და, რომ ელექტრომაგნიტური ძალების გავლენით კონტური 2-ის dl სიგრძის ელემენტი, თავისუფლად გადაადგილდა dx მანძილზე. მაშინ (2,22)-ს თანახმად, dl ელემენტზე მოქმედი ძალა F ; ტოლი უნდა იქნეს

$$F = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dx} \quad (2,24)$$

ურთიერთინტექციის ნაკადის ნაზრდი ტოლი იქნება

$$d\Phi_{12} = i_1 dM_{12} \quad (2,25)$$

ამასთან

$$d\Phi_{12} = B a x d l, \quad (2,26)$$

სადაც B — i_1 დენით შექმნილი ინდუქციის ვექტორია, რომელიც პერპენდიკულარულია $dx dl$ ელემენტარული ფართის.

გადავწყვეთ რა ერთად (2,24), (2,25) და (2,26), ვიპოვით

$$F = B i_2 d l. \quad (2,27)$$

ამ სახით ელექტრომაგნიტური ძალების კანონი შეიძლება ჩამოყალიბებულ იქნეს შემდეგნაირად: გამტარის dl ელემენტზე მოქმედი ძალა ტოლია B ინდუქციის ნამრავლისა i_2 დენზე და dl სიგრძეზე. ძალის მიმართულება პერპენდიკულარულია \vec{B} და \vec{dl} ვექტორების სიბრტყის და განისაზღვრება მარცხენა ხელის წესით (ნახ 10). ვექტორულ ფორმაში მივიღებთ

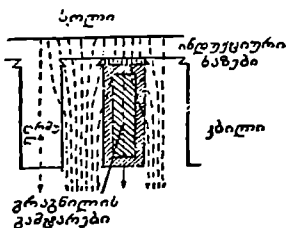
$$F = i_2 [\vec{dl} \cdot \vec{B}]. \quad (2,28)$$

თუ B ინდუქციას (2,27) გამოვსახავთ $V \text{ sec/cm}^2$ -ში, ხოლო dl — cm -ში, მაშინ ძალა F გამოსახული იქნება l/cm -ში.

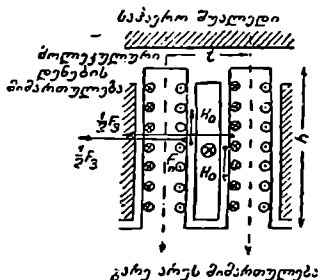
ხშირად F ძალას kG -ში, ხოლო B ინდუქციას Gs -ში, მაშინ (2,27)-ის მაგივრად უნდა დავწეროთ

$$F = 1,02 B_i dl \cdot 10^{-7} \text{kG}. \quad (2,29)$$

თანამედროვე ელექტრომანქანებში სტატორის და როტორის გრაგნილები ყოველთვის განლაგდებიან ღრმულელებში (ნახ. 11). ეს გვაძლევს საშუალებ-



ნახ. 11.



ნახ. 12.

ბას გრაგნილი მექანიკურად უკეთესად დავამაგროთ, უკეთესად მოვახდინოთ მისი იზოლირება და დავიცვათ იგი გარეშე ზემოქმედებისაგან და შევამციროთ სპაერო სივრცე სტატორსა და როტორს შორის.

განვიხილოთ, როგორ მოქმედებს გამტარების ღრუბლებში ჩალაგება, გამტარებზე მოქმედ ელექტრომაგნიტურ ძალებზე. პირველი შეხედვით შეიძლება გვეჩვენოს, რომ ძალები, რომლებიც მოქმედებენ გრაგნილებს შორის, მათი ღრმულელებში ჩალაგებისას ძლიერ მცირედებიან ღრმულელების კედლების მაექრანირებელი მოქმედების შედეგად.

გარეშე არეს მოქმედების შედეგად (ნახ. 12) კბილების ტანი დაძვინტდება და, როგორც ცნობილია ფერომაგნიტიზმის თეორიიდან, კბილებს აზედაპირზე წარმოიშვება მოლეკულური დენები, რომელთა მაგნიტური არეჯამდება რა გარე არესთან, ქმნის რეზულტიური ინდუქციის კბილებში და თითქმის მთლიანად სპობს არეს ღრმულელებში.

მოლეკულური დენი კბილების ზედაპირზე მათი სიმაღლის 1 cm -ზე განისაზღვრება სრული დენის კანონიდან:

$$\Delta i_m = \frac{B}{\mu_0} - H \text{ A/cm}, \quad (2,30)$$

სადეც B — კბილის ზედაპირზე ინდუქციის ვექტორის მდგენელია რომელიც კბილის კედლის პარალელურია H —მაგნიტური არეს დაძაბულობის ვექტორის ღრმულის კედლის პარალელური მდგენელია კბილის ზედაპირთან ღრმულეში, $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ H/cm}$.

აღვილად შეიძლება დარწმუნება, რომ დენი Δi_m შეიძლება იყოს ძალზე

დიდი. მაგალითად, როდესაც $H=200$ A/cm, $B=i8\ 000$ Gs $=1,8 \cdot 10^{-4}$ V sec/cm.² (2,30)-ს თანახმად გვაქვს

$$\Delta i_{\mu} = \frac{1,8 \cdot 10^{-4}}{1,256 \cdot 10^{-8}} - 200 = 14\ 100 \text{ A/cm.}$$

საერთო დენი კბილის ზედაპირზე ტოლია $\Delta i_{\mu} h = i_{\mu}$

მოლეკულური დენები, ურთიერთქმედებენ რა გარე არესთან, ქვნიან ძალებს, რომლებიც მოქმედებენ კბილის კედლებზე ორივე მხრიდან ურთიერთ საწინააღმდეგო მიმართულებით, ამიტომ გარე არეს, მოლეკულურ დენებთან ურთიერთზემოქმედებით კბილზე მოქმედი რეზულტიური ძალა ნულის ტოლია. სხვა მდგომარეობაშია, ღრუბლებში მოთავსებულ გამტარების i სრული დენის მიერ შექმნილი არე.

შეიძლება ჩათვალოთ, რომ ამ არეს დაძაბულობის H_0 ვექტორის ტანგენციალური მდგენელი ღრუბლის კედლებთან, და მაშასადამე, კბილის შიგნითაც მის ზედაპირთან¹ ღრმულის სრული დენის პროპორციულია:

$$H_0 = ki. \quad (2,31)$$

როგორც ფიგ. 12-დან ჩანს H_0 არეს დაძაბულობას ღრუბლის საწინააღმდეგო კედლებთან აქვს სხვადასხვა მიმართულება. ამ არეს მოლეკულურ დენებთან ურთიერთქმედების შედეგად კბილზე მოქმედებს ძალა (2,27)

$$F_3 = 2i_{\mu} H_0 \mu_0 l = 2i_{\mu} k i \mu_0 l, \quad (2,32)$$

სადაც $H_0 \mu_0$ —ღრმულის დენის არეს ინდუქციაა, l —ღრმულის სიგრძე. ღრმულში მდებარე გამტარზე უშუალოდ მოდებული ძალა დამოკიდებულია ღრმულის რეზულტიურ არეზე და ტოლია:

$$F_{\mu} \approx \mu_0 B i l. \quad (2,33)$$

ვინაიდან რეზულტიური არე H უნიშვნელოა, ეს ძალა არ არის დიდი და შეადგენს კბილზე მოდებულ F_3 ძალის $5 \div 10\%$. ამგვარად, გამტარების ღრმულებში ჩალაგებისას, ელექტრომაგნიტური ძალები უმთავრესად მოდებულია კბილებზე და გამტარები ღრმულებში თითქმის მთლანად განტვირთულია მექანიკური ძალებისაგან.

ღრმულის გამტარებზე და კბილზე მოქმედი საერთო ძალა $F = F_3 + F_{\mu}$ პრაქტიკულად ტოლია

$$F = B i l, \quad (2,24)$$

სადაც B —ინდუქციის საშუალო მნიშვნელობაა საპაერო შუალედში კბილის ნაბიჯის l სიგრძეზე (ნახ. 12).

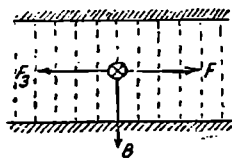
3. ელემენტური მანძანის უმცვევადლოვის პრინციპი

ყოველ ელექტრულ მანქანაში ენერგიის გარდაქმნის მიმართულება შეიძლება შეცვლილ იქნას საწინააღმდეგო მიმართულებით.

¹ მაგნიტური არეს დაძაბულობის ტანგენციალური მდგენელი მისი ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას რჩება უცვლელი!

თუ მანქანის ლილვზე მივიყვანთ მექანიკურ ენერგიას, მაშინ იგი მანქანაში შეიძლება გარდაიქმნას ელექტრული დენის ენერგიად. პირიქით, თუ იმავე მანქანის გრაგნილს ვკვებავთ დენით, მაშინ ელექტრული დენის ენერგია მანქანაში გარდაიქმნება ბრუნვითი მოძრაობის მექანიკურ ენერგიად.

მაშასადამე, ყოველ ელექტრულ გენერატორს შეუძლია იმუშაოს ძრავად და პირიქით.



ნახ. 13.

შედგება მაგნიტურ არეში მოთავსებული გამტარისაგან (ნახ. 13) გამტარს გარედან მოედოთ ძალა F და დავიწყოთ მისი გადაადგილება მაგნიტურ არეში ინდუქციის B ვექტორის პერპენდიკულარული მიმართულებით, მუდმივი v სიჩქარით. გამტარში აღძრული ე. მ. ძ. (2,12)-ს თანახმად ტოლი იქნება

$$e = B!v, \quad (3,1)$$

სადაც B —ინდუქციის საშუალო მნიშვნელობაა გამტარის l სიგრძის გასწვრივ. თუ გამტარს ჩავეტრავთ რაიმე გარე წინააღმდეგობაზე, მაშინ მასში გაივლის დენი i , ნახ. 13-ზე ნაჩვენები მიმართულებით. თანაბარ მაგნიტურ არეში დენი i იქნება მუდმივი.

განვიხილოთ ასეთი ელემენტარული გენერატორის ენერგეტიკული ბალანსი. გამტარში i დენის გავლის დროს, მასზე იმოქმედებს ელექტრომაგნიტური ძალა, რომელიც (2,27)-ს თანახმად ტოლია:

$$F_g = Bil, \quad (3,2)$$

და მიმართულია გამტარის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ. ამიტომ თანაბარ მოძრაობის დროს გამტარზე მოდებული გარეშე ძალა, ტოლი უნდა იყოს

$$F = F_g, \quad (3,3)$$

მის მიერ განვითარებული სიმძლავრე კი

$$Fv = F_g v. \quad (3,4)$$

ჩაგვავთ რა მარჯვენა ნაწილში F_g და v -ს ნაცვლად მათ მნიშვნელობებს (3,1) და 3,2-დან, მივიღებთ:

$$Fv = Bilv = ei \quad (3,5)$$

ეს ტოლობა გვიჩვენებს, რომ ელექტრულ გენერატორში გარედან დახარჯული მექანიკური სიმძლავრე მთლიანად გადადის ელექტრული დენის სიმძლავრეში.

თუ გამტარის F გარეშე ძალას არ მოვდებთ და მასში გარეშე წყაროდან გავუშვებთ i დენს, მაშინ გამტარზე იმოქმედებს მხოლოდ ელექტრომაგნიტური ძალა F_a . ამ ძალის გავლენით გამტარი გადაადგილდება მაგნიტურ არეში სანაწინააღმდეგო მიმართულებით, ვიდრე ეს გვექონდა გენერატორად მუშაობის დროს.

გამტარის მოძრაობა შეიძლება გამოყენებულ იქნას სასარგებლო მექანიკური მუშაობის შესასრულებლად. ამ შემთხვევაში გამტარი შეიძლება განვიხილოთ როგორც ელემენტარული ელექტროძრავი.

ელექტრული სიმძლავრე, მიყვანილი გარედან ასეთ ძრავთან, ტოლი იქნება ui . მასზე მოდებული ძაბვა u , გაწონასწორებულ უნდა იქნას გამტარში აღძრულ ე. მ. დ. და ძაბვის ვარდნით მის r წინააღმდეგობაში.

$$u = e + ir, \quad (3,6)$$

ამიტომ, ქსელიდან მოხმარებული სიმძლავრე ტოლია

$$ui = ei + i^2 r. \quad (3,7)$$

ჩავსვათ რა e -ს ნაგვირად ე. მ. დ. მნიშვნელობას, (3,1)-დან მივიღებთ:

$$ui = B\omega i + i^2 r, \quad (3,8)$$

ან (3,2)-ის თანახმად

$$ui = F_a \omega + i^2 r. \quad (3,9)$$

ტოლობიდან (3,9) გამომდინარეობს, რომ ძრავის მიერ ქსელიდან მოხმარებული ელექტრული სიმძლავრე, ნაწილობრივ გადადის სასარგებლო მექანიკურ სიმძლავრედ, რომელსაც ანვითარებს ძრავი, და ნაწილობრივ იხარჯება მასში დანაკარგებზე.

განხილული მაგალითი იძლევა ელექტრული მანქანის შექცევადობის პრინციპის ილუსტრაციას.

4. ელექტრული მანქანების ძირითადი სახეები და მათი მოწყობილობის პრინციპი

ვიდრე გადავალთ ელექტრული მანქანების ცალკეული სახეების თეორიის დაწვრილებით გადმოცემაზე, შემიღგომი მასალის გაგების გასაადვილებლად ჩვენ მოკლედ გადმოვცემთ ელექტრული მანქანების ძირითადი სახეების — ტრანსფორმატორების, ასინქრონული და სინქრონული მანქანების მუშაობის და მოწყობილობის პრინციპებს, გამოვარკვევთ კოლექტორის დანიშნულებას, რომელიც წარმოადგენს კოლექტორული მანქანების ძირითად მუშა ორგანოს, და მოკლედ განვიხილავთ უკანასკნელის მოწყობილობას.

ა) ტრანსფორმატორები. ერთთაზა ტრანსფორმატორი წარმოადგენს ფერომაგნიტური მასალის ჩაკეტილ გულანას, რომელზედაც განლაგებულია გრაგნილები (ნახ. 14).

თუ გახსნილი მეორადი გრაგნილის დროს, ტრანსფორმატორის W_1 ხვევების მქონე პირველად გრაგნილს მიუერთებთ u_1 ძაბვის მქონე ცვლადი

დენის წყაროს¹, მაშინ პირველად გრაგნილში გაივლის დენი i_1 , რომელიც გულანაში შექმნის Φ მაგნიტურ ნაკადს. ეს მაგნიტური ნაკადი შებმული იქნება პირველადი და მეორადი გრაგნილის თითქმის ყველა ხვევებთან.

მის მიერ პირველად გრაგნილში აღძრული ე. მ. ძ.

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4,1)$$

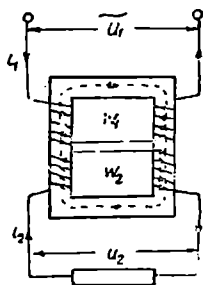
აქტიურ წინააღმდეგობაში $i_1 r_1$ ძაბვის ვარდნასთან ერთად გააწონასწორებს პირველად ძაბვას

$$u_1 = -e_1 + i_1 r_1.$$

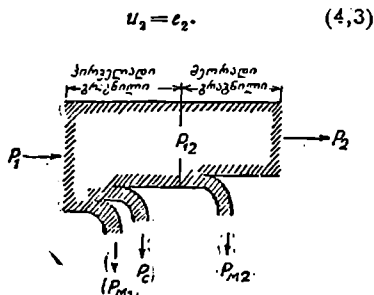
W_2 ხვევების მქონე მეორად გრაგნილში, მაგნიტური ნაკადი აღძრავს ე. მ. ძ. ტოლს

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4,2)$$

მეორადი გრაგნილი წარმოადგენს ცვლადი დენის წყაროს, მხოლოდ უკვე სხვა ძაბვით:



ნახ. 14. ერთჯერა ტრანსფორმატორის სქემა.



ნახ. 15.

ტრანსფორმატორის გრაგნილების ე. მ. ძ-ს შეფარდებას

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2} = k_{12} \quad (4,4)$$

უწოდებენ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტს.

თუ მეორად გრაგნილს ჩავკეტავთ წინააღმდეგობაზე, მაშინ მეორად წრელში გაივლის დენი i_2 და პირველად გრაგნილიდან მეორადში მაგნიტური არეს საშუალებით გადაეცემა ენერგია. უგულვებელყოფთ რა დანაკარგებს, რომლებიც ტრანსფორმატორში საერთოდ არ არიან დიდი, ენერგიის შენახვის კანონის მიხედვით მივიღებთ:

$$e_1 i_1 \approx e_2 i_2 \quad (4,5)$$

¹ ჩვენ აქ განვიხილავთ ყველა სიდიდეების მყისა მნიშვნელობებს, უშვებთ რა, რომ ისინი დროის მიხედვით სინუსოიდურად იცვლებიან.

$$\frac{i_1}{i_2} \approx \frac{e_2}{e_1} = \frac{u_2}{u_1} \approx \frac{u_2}{u_1}, \quad (4,6)$$

ე. ი. ტრანსფორმაციის დროს დენები იცვლებიან ძაბვის უკუპროპორციულად.

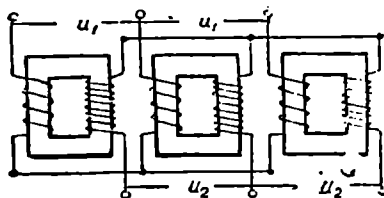
ტრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრის ფარგლებში დატვირთვისას, ფ მაგნიტური ნაკადის აპლიტუდური მნიშვნელობა მცირედ იცვლება, რადგან ამ ნაკადით აღძრულმა ე. მ. ძ. როგორც $i_2 = 0$, ასევე სხვა ნებისმიერ დატვირთვების დროს უნდა გააწონასწოროს პირველად გრაგნილზე მოდებული უცვლელი ძაბვა

$$u_1 = -e_1 + i_1 r_1 \approx -e_1 = u_1 \frac{d(\Phi)}{dt}. \quad (4,7)$$

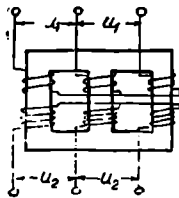
დატვირთვის დროს ფ ნაკადი იქმნება ორივე გრაგნილების სრულ დენით: $i_1 w_1 + i_2 w_2$, ამიტომ ტრანსფორმატორის დატვირთვის (i_2 — დენის) ცვლილების დროს, სრული დენის ეფექტური მნიშვნელობა მცირედ იცვლება.

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 \approx \text{const},$$

და რჩება დაახლოებით პირველადი გრაგნილის $I_{10} w_1$ სრული დენის ტოლი



ნახ. 16. სამი ერთობა ტრანსფორმატორის სამუხა ჯგუფად შეერთების სქემა.



ნახ. 17. სამუხა ტრანსფორმატორის სქემა.

უქმი სვლის დროს, ე. ი. გახსნილი მეორადი გრაგნილის შემთხვევაში, როდესაც $i_2 = 0$:

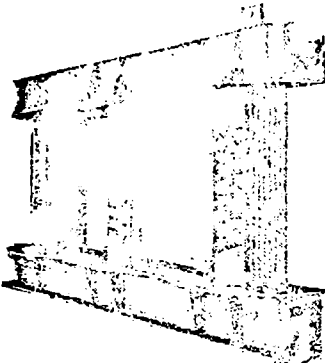
$$I_1 w_1 + I_2 w_2 \approx I_{10} w_1. \quad (4,8)$$

უქმი სვლის დროს, ფოლადის გულანას მაღალი მაგნიტური განვლადობის გამო პირველადი გრაგნილის სრული დენი $I_{10} w_1$ არ არის დიდი და ნომინალური დატვირთვის დროს იმავე გრაგნილის $I_1 w_1$ სრული დენის მხოლოდ რამდენიმე პროცენტის ტოლია.

ამიტომ (4,8) ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ $I_1 w_1 \approx -I_2 w_2$ ე. ი. დატვირთვებისას; რომლებიც ახლოს არიან ნომინალურთან, დენები I_1 და I_2 ურთიერთ შორის დაძრული არიან $\sim 180^\circ$ კუთხით და მაგნიტური მზრივ პირველადი და მეორადი გრაგნილების სრული დენები აწონასწორებენ ერთმან-

ნეთს იმდენად, რამდენადაც ეს საჭიროა Φ მაგნიტური ნაკადის შესანარჩუნებლად.

ტრანსფორმატორის ენერგეტიკული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 15-ზე. პირველად გრაგნილთან მიყვანილი P_1 ელექტრული სიმძლავრე, იკარგება რა ნაწილობრივ პირველად გრაგნილში $P_{\Sigma 1}$ ჯოულის დანაკარგების და გულანას გადამაგნიტებაზე P_c დანაკარგების სახით, მაგნიტური არეს საშუალებით გადაეცემა მეორად გრაგნილში: $P_1 - P_{\Sigma 1} - P_c = P_{12}$.



P_{12} გადაცემული სიმძლავრის ნაწილი, იკარგება $P_{\Sigma 2}$ ჯოულის დანაკარგების სახით მეორად გრაგნილში. დანარჩენი ნაწილი P_2 კი ელექტრული სიმძლავრის სახით გადაეცემა მეორად ქსელში.

სამფაზა დენის ტრანსფორმირებისათვის თანამედროვე ელექტროდანადგარებში იყენებენ სამ ერთფაზა ტრანსფორმატორს, რომელთა გრაგნილები შეერთებული არიან ვარსკვლავად ან სამკუთხედად (ნახ. 16) ან სპეციალურ სამფაზა ტრანსფორმატორებს.

ნახ. 18. სამფაზა ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემა (გულანა). სამი ლეროთი (ნახ. 17), რომლებზედაც განლაგდება ცალკეული ფაზების გრაგნილები.

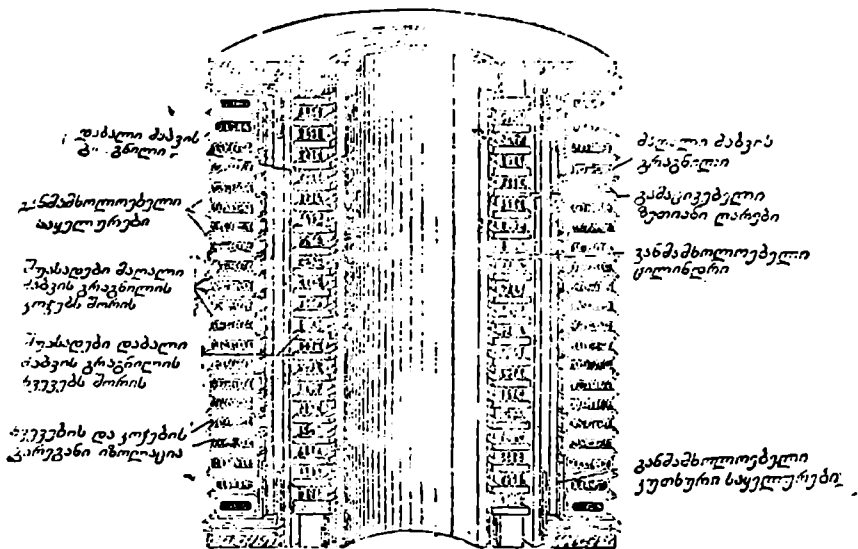
გრიგალისებურ დენების მიერ გამოწვეულ დანაკარგების შესამცირებლად ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემა შხადდება სპეციალური თხელი ფურცლოვანი ფოლადისაგან. ძალოვან ტრანსფორმატორებში ფურცლების სისქე იღება $0,35] \div 0,5 \text{ mm}$. ფურცლები ერთი მეორისაგან განმხოლოვდებიან ლაქით ან პაპიროსის ქაღალდით და ერთმანეთთან მაგრდებიან ლითონის ან ხის სარკებით. სამფაზა ძალოვანი ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემა ნაჩვენებია ნახ. 18-ზე. ტრანსფორმატორის გრაგნილები სრულდება საკაბელო ქაღალდით ან ბამბის ნართით გამხოლოებული სპილენძის მავთულისაგან. უფრო მეტი მექანიკური და ელექტრული სიმტკიცისათვის გრაგნილები გაიჟინთებიან ლაქით. ჩვეულებრივად დაბალი და მაღალი ძაბვის გრაგნილები კონცენტრულად განლაგდება (ნახ. 19).

გრაგნილების უკეთესი გაცივებისა და განმხოლოვებისათვის ძალოვანი ტრანსფორმატორები თავსდება მინერალურ ზეთიან სპეციალურ ავზში. ავზის კედლები ცივდება ბუნებრივად ჰაერით ან შემობერება ვენტილატორით.

თანამედროვე ტრანსფორმატორებში აიგება რამდენიმე ვოლტამპერიდან 100 000 kVA სიმძლავრით ერთ ერთეულში. ძალოვანი ტრანსფორმატორების უმაღლესი ძაბვა (ა. შ. შ.) 290 kV. ლაბორატორიული ტრანსფორმატორები აგებულია ძაბვით 1 000 kV-მდე.

ელექტრული ენერჯიის ტრანსფორმაციის საჭიროება გვხვდება წარმოების და ტექნიკის სულ სხვადასხვაგვარ დარგებში. ამის მიხედვით არსებობს ტრანსფორმატორების დიდა ნაირსახეობა, როგორც დანიშნულების და კონს-

ტრუქციის, ასევე სიმძლავრის და ძაბვის მიხედვით. ნახ. 21-ზე მასშტაბში ნაჩვენებია მოსკოვის კუიბიშევის სახელობის სატრანსფორმატორო ქარხანაში აგებული ორი ტრანსფორმატორი: მარცხნივ—20,000 kVA სიმძლავრის ერთ-ფაზა ტრანსფორმატორი ხაზურ ძაბვაზე (მაღალი ძაბვის გრაგნილი) 240 kV. და მარჯვნივ—ტრანსფორმატორი, რომლის უმაღლესი ძაბვა უდრის 120 V, ხოლო სიმძლავრე — 40 VA.



ნახ. 19.

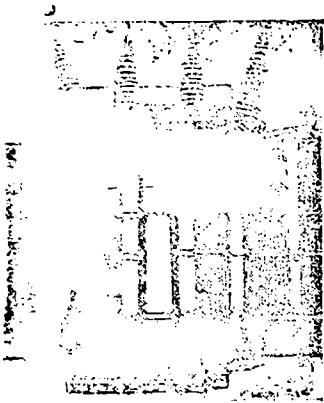
ბ) ასინქრონული მანქანები. ასინქრონული მანქანა ტრანსფორმატორისაგან განსხვავებით წარმოადგენს მბრუნავ მანქანას და მუშაობს მბრუნავი არეს მქონე ტრანსფორმატორის პრინციპზე. ასინქრონული მანქანა შედგება ორი ძირითადი ნაწილისაგან. 1 — უძრავი — სტატორისა და 2 — მოძრავი (მბრუნავი) — როტორისაგან (ნახ. 22).

სტატორი და როტორი გრიგალისებურ დენებზე დანაკარგების შესამცირებლად, აკრეფილია თხელი განმხოლოებელი ფოლადის ფურცლებისაგან.

სტატორისა და როტორის ფურცლებში საპაერო შუალედის მხრიდან ამოტვიფრულია ღრმულები, რომლებშიც განლაგებულია გრაგნილები. (ნახ. 22-ზე) ნაჩვენებ შემთხვევაში ყოველი ფაზის გრაგნილი განლაგებულია 12 ღრმულში, რომელთაგან მეზობლად მდებარე ექვსი ღრმული დაკავებულია ფაზის პირდაპირი გამტარებით, ხოლო ექვსი დიამეტრალურად მოწინააღმდეგე ღრმული იმავე ფაზის უკუგამტარებით¹.

¹ აქ ცნება პირდაპირი და უკუგამტარი ფარდობითია და ახასიათებს მხოლოდ დენების საწინააღმდეგე მიმართულებას მათში.

პირდაპირი და უკუგამტარების შეერთება განხორციელებულია მანქანის ტორსულ ნაწილებზე. ყოველი ფაზის პირდაპირი (უკუ) გამტარები დაძრულია სტატორის წრეხაზის გასწვრივ 120° .



ნახ. 20. ხუთიან ავზში მოთავსებული სამფაზა ტრანსფორმატორის გარეგანი ხედი. ავზის კედლებზე განლაგებულია რადიატორები გასაცივებელი ხედაპირის გასადიდებლად.

როტორის გრაგნილი კეთდება სამფაზა, ან უფრო ხშირად სპილენძის ან ალუმინის ლეროების სახით, რომლებიც ორივე ტორსზე შეერთებულია საერთო რგოლებით (ე. წ. მ.ოკლედ შეერთული როტორები (ნახ. 30).

სტატორის გრაგნილის სამფაზა ღენით კეების დროს სტატორსა და როტორში შეიქმნება მაგნიტური არე, რომლის განაწილებაც იცვლება ცალკეულ ფაზებში ღენის მყისი მნიშვნელობების მიხედვით.

ნახ. 22-ზე სქემატურად ნაჩვენებია ღენებისა და მაგნიტური არეს განრიგება დროის იმ მომენტისათვის, როდესაც პირველ ფაზაში ღენი აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას, ხოლო ღენებს ორ სხვა ფაზაში აქვს საწინააღმდეგო მიმართულება და უდრის OA -ს ე. ი. პირველი ფაზის ღენის ნახევარს.

როგორც ნახ. 22-დან ჩანს მანქანაში მაგნიტური არეს ლერძი C_1D_1 ამ მომენტში ემთხვევა პირველი ფაზის ლერძს.

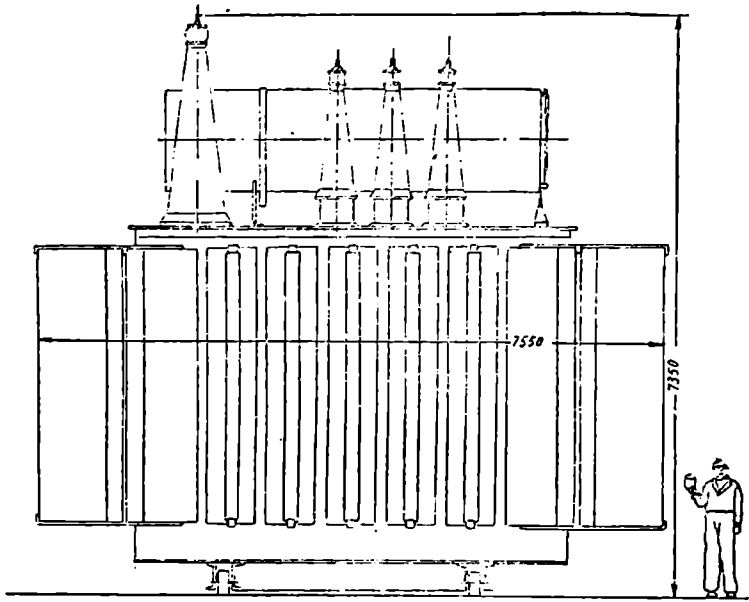
$\frac{1}{3}$ პერიოდის შემდეგ მეორე ფაზაში ღენი გახდება მაქსიმალური. ცხადია, რომ ამ მომენტში ყველა ფაზების სიმეტრიულობის გამო მაგნიტური არეს განრიგება დარჩება ისეთივე, მხოლოდ მისი ლერძი მიიღებს C_2D_2 მდებარეობას, რომელიც ემთხვევა მეორე ფაზის ლერძს. კიდევ $\frac{1}{3}$ პერიოდის შემდეგ მაგნიტური არეს ლერძი უკვე დამთხვევა მესამე ფაზის ლერძს და მიიღებს C_3D_3 მდებარეობას.

ამგვარად ჩვენ ვხედავთ, რომ განხილულ სამფაზა ასინქრონულ მანქანაში მაგნიტური არე სივრცეში არ რჩება უძრავი, არამედ ბრუნავს და ცვლადი ღენის ერთი პერიოდის განმავლობაში აკეთებს ერთ სრულ ბრუნს: ასეთ არეს მბრუნავ არეს უწოდებენ.

მბრუნავი არე სტატორისა და როტორის გრაგნილებში აღძრავს ე. მ. ძ. სტატორის ე. მ. ძ. ძაბვის ვარდნის აქტიურ მდგენელთან ერთად აწონასწორებს სტატორის ფაზებზე მოდებულ ძაბვას. როტორის ე. მ. ძ. ჰქმნის მის გრაგნილში ღენს.

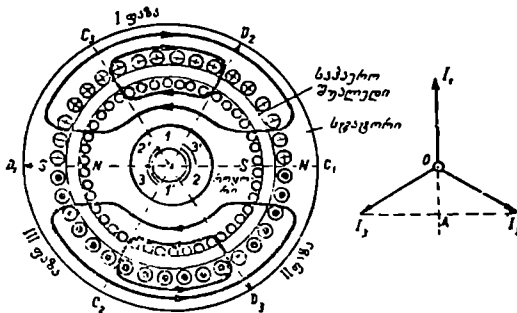
როტორის გახსნილი გრაგნილის შემთხვევაში მბრუნავი მაგნიტური არე იქმნება მხოლოდ სტატორის ღენით. როტორის გრაგნილში ღენის გავლის დროს მაგნიტური არე იქმნება სტატორისა და როტორის ღენების ერთდროული დამამაგნიტებელი მოქმედებით. ისე როგორც ტრანსფორმატორში, მეორადი ღენის ცვლილებების დროს (როტორის ღენი) ნულოვანი მნიშვნელობიდან იმ მნიშვნელობამდე, რომელიც შეესაბამება სრულ დატვირთვას, სტატორისა

და როტორის გრაგნილებთან შებმული მაგნიტური ნაკადი მცირე სიდიდით იცვლება, რადგანაც მის მიერ სტატორში აღძრულმა ე. მ. ძ. დაახლოებით უნდა



ნახ. 21. 20 000 KVA, 240 KV და 40 VA, 120V-ს მქონე ერთფაზ ტრანსფორმატორების შედარებითი ზომები.

ვააწონასწოროს ძრავის დატვირთვის დროს უცვლელი სიდიდის პირველადი ძაბვა. ამიტომ ასინქრონულ მანქანაში, რომელსაც აქვს ტრანსფორმატორული



ნახ. 22 სამფაზა ასინქრონული მანქანის სქემა.

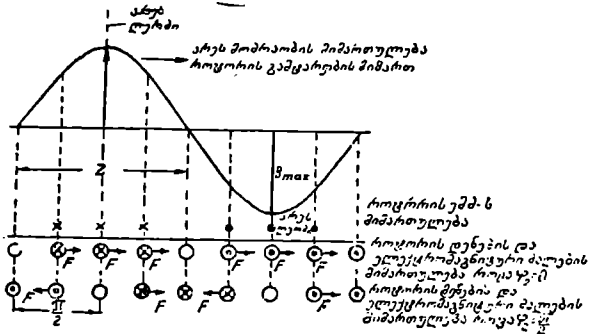
კაფშირი სტატორსა და როტორს შორის, სტატორის (პირველადის) და რო-

ტორის (ნეო-რადის) გრაგნილების, დამამაგნიტებელი მოქმედება, ისე, როგორც ტრანსფორმატორში, ურთიერთკომპენსირდება იმდენად, რამდენადაც. ეს საჭიროა მანქანის მაგნიტური ნაკადის შესანარჩუნებლად.

რეზულტიური მბრუნავი მაგნიტური არე როტორის დენთან ურთიერთქმედებით ქმნის მომენტს, რომელიც აბრუნებს როტორს მაგნიტურ არეს მბრუნავის მიმართულებით.

იმ პირობების გამოსარკვევად, რომლის დროსაც როტორის გამტარებზე მოქმედი ელექტრომაგნიტური ძალები ქმნიან ამ მომენტს, განვიხილოთ ნახ. 23.

დროის განხილულ მომენტში ზემო მრუდი გამოსახავს მაგნიტური ინდუქციის განაწილებას (პირობითი გაშლილი) საპაერო შუალედის გასწვრივ. არე



ნახ. 23. ასინქრონული მანქანის მაგნიტური არეს და როტორის მოკლედ შერთული გრაგნილის დენების ურთიერთქმედება.

გადაადგილდება რა საპაერო შუალედის გასწვრივ მარცხნიდან მარჯვნივ, მოკლედშერთული როტორის გამტარებში აღძრავს ე. მ. ძ. $e = Blv$, რომელთა მიმართულებაც ნაჩვენებია ჯვრებით და წერტილებით. როტორის წრედს რომ ჰქონოდა მხოლოდ აქტიური წინაღობა (როტორის დენსა და ე. მ. ძ. შორის ძვრის კუთხე $\varphi_2 = 0$), მაშინ ყოველ გამტარში დენის ძალა ფაზით დაემთხვეოდა ე. მ. ძ. და ელექტრომაგნიტური ძალები $F = Bli$, გამტარებზე იმოქმედებდა მხოლოდ მაგნიტური არეს მოძრაობის მიმართულებით. მეორე უკიდურეს შემთხვევაში, როდესაც $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$, როტორის წრედს რომ ჰქონოდა წმინდა

ინდუქტიური წინაღობა, როტორის გამტარში დენი ტოლი იქნებოდა ნულის, მაშინ, როდესაც ამ გამტარში ე. მ. ძ. აქვს მაქსიმალური მნიშვნელობა.

როგორც ნახ. 23-დან ჩანს ამ დროს ელექტრომაგნიტური ძალები F მოქმედებენ გამტარებზე სხვადასხვა მიმართულებით და ჯამში არ ქმნიან მამბრუნ მომენტს. ძრავს ამ შემთხვევაში ბრუნვა არ შეუძლია.

შუალედი შემთხვევებისათვის, რომლებსაც ადგილი აქვთ სინამდვილეში $0 < \varphi_2 < \frac{\pi}{2}$, ელექტრომაგნიტური ძალების დადებითი მომენტები ყოველთვის.

მეტი იქნება უარყოფით მომენტებზე და ძრავი იბრუნებს არეს ნიშართულებით.

ძრავის ბრუნვის მიმართულების შეცვლისათვის საკმარისია შევცვალოთ არეს ბრუნვის მიმართულება სტატორის გრაფნილში, ფაზების მიმდევრობის რიგის შეცვლით.

ძრავს ეწოდება ასინქრონული, იმიტომ, რომ მისი როტორი ყოველთვის ბრუნავს ასინქრონულად მაგნიტური არეს ბრუნვის მიმართ. როტორს არ შეუძლია არესთან სინქრონულად ბრუნვა, ვინაიდან ე. მ. დ. მის გრაფნილში ამ დროს ნულის ტოლი იქნება, მასში არ გაივლის დენი, და, მაშასადამე როტორის გამტარებზე არ იმოქმედებს ელექტრომაგნიტური ძალები, რომლებიც ჰქმნიან ბრუნვის მომენტს.

ასინქრონულ ძრავებს უწოდებენ აგრეთვე ინდუქციურ ძრავებს.

ასინქრონიზმს ზომავენ სრიალით.

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}, \quad (4,9)$$

სადაც ω_1 —არეს მექანიკური კუთხური სიჩქარეა, ω_2 —როტორის მექანიკური კუთხური სიჩქარე.

სრიალი ახასიათებს $s\omega_1$ სიჩქარეს, რომლითაც მაგნიტური არე გადაადგილდება როტორის გამტარების მიმართ, ამიტომ როტორის დენის სიხშირე ტოლია $f_2 = sf_1$, სადაც f_1 სტატორის დენის სიხშირეა. როდესაც არა გვაქვს დატვირთვა, ე. ი. ძრავი მუშაობს უქმად, სრიალი s ძალზე მცირეა. ძრავის დატვირთვის შემთხვევაში სრიალი იწყებს ზრდას, მასთან ერთად, იზრდება როტორის ე. მ. დ. და დენი. სრიალის გაზრდა გრძელდება მანამდე, ვიდრე როტორის ნუარდი დენი მაგნიტურ არესთან ურთიერთქმედებით არ შექმნის მამბრუნ მომენტს, რომელსაც შეუძლია ძრავის ლილვზე სასარგებლო დატვირთვის სახით მიღებული წინააღმდეგობის მომენტის დაძლევა. ნორმალური დატვირთვის დროს სრიალი მცირეა და უდრის რამდენიმე პროცენტს, ასე, რომ ასინქრონული ძრავები მუშაობენ თითქმის ნულმივი ბრუნვის სიჩქარით.

ასინქრონული ძრავების ნაკლს შეადგენს შედარებით დიდი რეაქტიული სიმძლავრე, რომელსაც მოითხოვს ქსელიდან მაგნიტური არეს შესაქმნელად (ნახ. 24).

დენი სტატორის ფაზაში ტოლია

$$I_1 = I_{1a} + I_{1r} \quad (4,10)$$

სამფაზა ძრავის მიერ ქსელიდან შთანთქმული აქტიური სიმძლავრე ტოლია

$$P_{1a} = 3U_1 I_{1a} \quad (4,11)$$

იგი გარდაიქმნება სასარგებლო მექანიკურ P_2 სიმძლავრედ ძრავის ლილვზე და ნაწილობრივ იხარჯება დანაკარგებზე ძრავში.

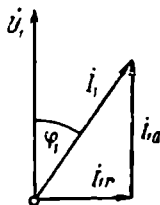
ასინქრონული ძრავის ენერგეტიკული სქემა წარმოდგენილია ნახ. 25-ზე. ისე, როგორც ტრანსფორმატორში მაგნიტური არეს საშუალებით პირველა-

დი ქსელიდან მეორად გრაგნილში გადაცემული P_{12} ელექტრული სიმძლავრე ტოლია:

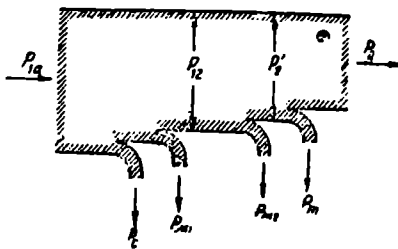
$$P_{12} = P_{1a} - P_{M1} - P_e, \quad (4, 12)$$

სადაც P_{M1} ჯოჯის დანაკარგებია პირველად გრაგნილში, P_e —დანაკარგები ფოლადში.

სიმძლავრე P_{12} , იკარგება რა ნაწილობრივ როტორის გრაგნილში P_{M2}



ნახ. 24



ნახ. 25.

ჯოჯის დანაკარგების სახით, გარდაიქმნება როტორში მექანიკურ სიმძლავრედ¹:

$$P'_2 = P_{12} - P_{M2}. \quad (4, 13)$$

ამ P'_2 სიმძლავრის ნაწილი იხარჯება როტორის ჰაერთან და საკისარებში ხახუნით გამოწვეულ P_m დანაკარგებზე, დანარჩენი ნაწილი კი

$$P_2 = P'_2 - P_m \quad (4, 14)$$

სასარგებლო სიმძლავრის სახით გამოიყენება მანქანის ლილვზე.

$$\text{ძრავის ბრუნვის სასარგებლო მომენტი } M = \frac{P_2}{\omega_2}.$$

როგორც ენერგეტიკული სქემის ანალიზიდან ჩანს ასინქრონული ძრავი შეიძლება განხილულ იქნას როგორც ტრანსფორმატორი, რომელშიც მეორად გრაგნილში გადაცემული ელექტრული ენერგია, ნაწილობრივ გარდაიქმნება ჯოჯის სითბოდ, ნაწილობრივ კი ბრუნვითი მოძრაობის მექანიკურ ენერგიად.

ქსელიდან შთანთქმული რეაქტიული სიმძლავრე

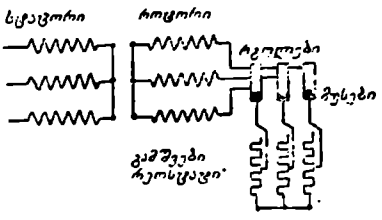
$$P_{1r} = 3U_1 I_{1r} \quad (4, 15)$$

იხარჯება ძრავის მაგნიტური არეს შექმნაზე, რომლის ენერგიაც უმთავრესად თავმოყრილია საჰაერო შუალედში. თანამედროვე ასინქრონული ძრავების სიმძლავრის კოეფიციენტი ჩვეულებრივად იმყოფება ფარგლებში: $\cos \varphi_1 = 0.75 \div 0.9$. რეაქტიული სიმძლავრის შემცირების მიზნით ასინქრონული მანქანების

1. როტორის ფოლადში დანაკარგები შეიძლება უგულვებლევით გადამაგნიტების $f_2 = f_1$ მცირე სიხშირის გამო.

საპაირო შუალედი კეთდება მცირე სიდიდის. მისი სიდიდე როტორის დიამეტრის მიხედვით ირხევა 0,2mm-დან 3mm-ის ფარგლებში.

ძრავის გამშვებისას, როდესაც როტორი უძრავია და $s=1$, როტორის ე. მ. ძ., დენის ძალა მასში და მაშასადამე სტატორის დენიც, დიდი სიდიდისაა. ზოგჯერ როტორის გრაგნილის ფაზების ბოლოები გამოყავთ სპეციალურ საკონტაქტო რგოლებზე და გაშვების დროს მათი საშუალებით როტორის წრედში რთავენ აქტიურ წინააღმდეგობებს (ნახ. 26).



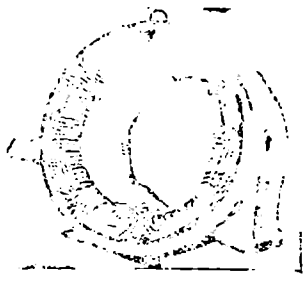
ნახ. 26. როტორის გრაგნილის საკონტაქტო რგოლების საშუალებით გამშვებ რეოსტატთან მიერთების სქემა.

გამშვები რეოსტატი ამცირებს ძრავის გაშვების დენს და ამცირებს რა φ_s ძვრის კუთხეს როტორის ე. მ. ძ. და დენს შორის, ზრდის გაშვების მომენტს. გაშვების ბოლოს როტორის რგოლები მოკლედ ჩაიკეტება. მოკლედ შერთული როტორების შემთხვევაში წრედში გამშვები რეოსტატის შეყვანა შეუძლებელია.

ასეთ ასინქრონულ ძრავებში გაშვების დენის შემცირებას და გაშვების



ნახ. 27. ასინქრონულ ძრავის საერთო ხედი როტორზე საკონტაქტო რგოლებით, გამშვები რეოსტატის მისაერთებლად.



ნახ. 28. სამფაზა ასინქრონული ძრავის სტატორი გრაგნილით.

მომენტის გაზრდას აღწევენ დენის გამოდენის მოვლენის გამოყენებით. ეს მოვლენა უფრო დაწვრილებით განხორციელებული იქნება IV ნაწილში.

ნორმალური ასინქრონული ძრავი არ იძლევა ბრუნვის სიჩქარის მართვით და ეკონომიური რეგულირების საშუალებას. ეს რამდენიმედ ზღუდავს ასინქრონული ძრავის გამოყენების სფეროს. ამ ძრავების სიჩქარის რეგულირება შესაძლებელია მხოლოდ სპეციალური სქემების გამოყენების დროს, რომლებიც დაწვრილებით იქნება განხილული შემდეგში.

ნახ. 27-ზე ნაჩვენებია ასინქრონული ძრავის საერთო ხედი. ნახ. 28-ზე ნაჩვენებია ძრავის სტატორი გრაფიკით.

თანამედროვე ასინქრონული ძრავების სიმძლავრე, რომლებიც წარმოადგენენ ძრავების ყველაზე უფრო გავრცელებულ ტიპს, ირხევა ფართო ზღვრებში—რამდენიმე ათეულ ვატიდან 15 000 kW-მდე, როდესაც სტატორის გრაფილის ძაბვა აღწევს 6 kV-მდე.

ნახ. 22-ზე განხილულ შემთხვევაში ცვლადი დენის ერთი პერიოდის



ნახ. 29. მძლავრი ასინქრონული ძრავის როტორის სამ საკონტაქტო რგოლზე გამოყვანილი სანფხა გრაფიკით.

განმავლობაში მაგნიტური არე აკეთებს ერთ სრულ ბრუნს. ამიტომ $f = 50 \text{ Hz}$ სიხშირის დროს მაგნიტური არე გააკეთებს 50 ბრუნს წამში და, მაშასადამე არეს ბრუნვის სიჩქარე ანუ ძრავის „ასინქრონული სიჩქარე“ ტოლია $n = 60 \times 50 = 3000$ ბრ/წთში. ეს არის ასინქრონული ძრავების მაგნიტური არეს მაქსიმალური ბრუნვის სიჩქარე, როდესაც $f = 50 \text{ Hz}$.

ნახ. 22-ზე წარმოდგენილ შემთხვევისათვის მაგნიტური არე სტატორზე და როტორზე ჰქმნის ერთ ჩრდილოეთ და ერთ სამხრეთ პოლუსს, ე. ი. ერთ წყვილ პოლუსს. ასეთ მანქანებს უწოდებენ ორპოლუსიანს.

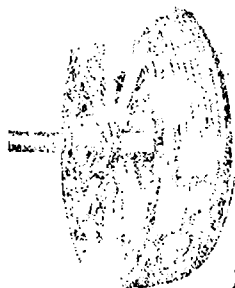
თუ სტატორის გრაფილის შევასრულებთ ისე, რომ ყოველი ფაზის პირდაპირი და უკუგამტარები დაყოფილი იქნებიან სტატორის წრეხაზის გასწვრივ სიმეტრიულად განლაგებულ 2, 3, 4... თანაბარ ჯგუფებად (ნახ. 31), მაშინ წყვილ პოლუსთან რიცხვი ტოლია 2, 3, 4...

მაგნიტური არე ერთი პერიოდის განმავლობაში გადაადგილდება სათანადოდ სტატორის წრეხაზის $1/2, 1/3, 1/4...$ ზე.

ამიტომ ასინქრონული ძრავების ასინქრონული სიჩქარე ე. ი. მათი არეს ბრუნვის სიჩქარე, შეიძლება გამოსახული იქნას შემდეგი ფორმულით:

$$n = \frac{60f}{p} \text{ ბრ/წთ.} \quad (4,16)$$

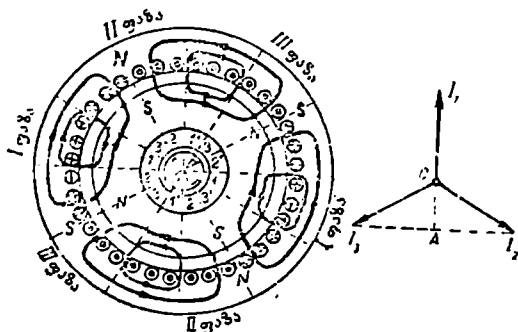
სადაც p —გრაფილის წყვილ პოლუსთა რიცხვია ნახ. 30 მძლავრი ასინქრონული (4,16)-ს შესაბამისად, როდესაც $f = 50 \text{ Hz}$ ძრავის როტორი მოკლედ შერთული გრაფილით. მივიღებთ ასინქრონული სიჩქარეების შემდეგ მნიშვნელობებს:



2P	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
"	3000	1500	1000	750	600	500	428,6	375	333,3	300

გ) სინქრონული მანქანები. ამჟამად ცვლადი დენის გენერატორები 'არულდებიან თითქმის მხოლოდ სინქრონული მანქანების სახით'. ფართო ვაერცელება ჰპოვეს აგრეთვე სინქრონულმა ძრავებმა.

სინქრონული მანქანა შედგება სტატორისაგან, რომლის ღრმულებში განლაგებულია სამფაზა ან ერთფაზა გრაგნილი, და როტორისაგან, რომელსაც აქვს მუდმივი დენის აგზნების გრაგნილი გამოყვანილი ორ საკონტაქტო რგოლზე. შედარებით იშვიათად გვხვდება სინქრონული მანქანები, რომლებ-



ფიგ. 31. ოთხპოლუსიანი ასინქრონული მანქანის სქემა. ინდუქციური ძალხაზების განაწილება ნაჩვენებია იმ მომენტისათვის, როდესაც დენის ძალას 1 ფაზაში აქვს ამპლიტუდური მნიშვნელობა.

შიც გვაქვს გრაგნილების შებრუნებული განლაგება: სტატორზე—მუდმივი დენის აგზნების გრაგნილი, როტორზე—ცვლადი დენის (სამფაზა) გრაგნილი, გამოყვანილი სამ საკონტაქტო რგოლზე.

სინქრონული მანქანის მუშაობის პრინციპის გამოსაკვლევად განვიხილოთ მისი მუშაობა გენერატორულ რეჟიმში.

ნახ. 32-ზე სქემატურად ნაჩვენებია სამფაზა დენის ორპოლუსიანი სინქრონული გენერატორი. როტორის გრაგნილში მუდმივი დენის გავლის დროს სტატორში და როტორში შეიქმნება მაგნიტური არე. რაიმე მექანიკური ძრავის საშუალებით როტორის მუდმივი სიჩქარით ბრუნვისას, სტატორის ყოველი ფაზის გრაგნილთან ნაკადშემბმის რიცხვი Γ პერიოდულად იცვლება და გრაგნილებში აღიძვრება ცვლადი ე. შ. ძ.

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (4,17)$$

ე. შ. ძ. აღძვრის პროცესი შეიძლება ახსნილ იქნას აგრეთვე როტორის ბრუნვის დროს გრაგნილების, M ურთიერთ ინდუქტიობის დროის მიხედვით პერიოდული ცვლის თვალსაზრისით:

$$e = -i_n \frac{dM}{dt}, \quad (4,18)$$

¹ სინქრონულ გენერატორებს ხანდახან უწოდებენ ალტენატორებს.

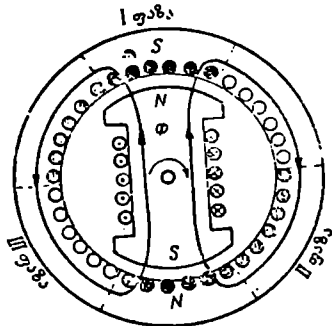
სადაც i_n — როტორის დენია

(4,17) და (4,18) გამოსახლებათა იგივეობა გამომდინარეობს ტოლობიდან:

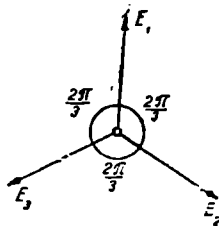
$$\Psi = i_n M, \quad (4,19)$$

რომელიც შეესაბამება ურთიერთინდუქტიობის ზოგად განსაზღვრას.

ამგვარად, სინქრონული გენერატორი შეიძლება განხილულ იქნას, როგორც ტრანსფორმატორი, რომელშიც ე. მ. ძ.-ის აღძვრა სტატორის გრაგნილში (მეორადში) ხდება პირველადი გრაგნილის ცვლადი დენით კვების ხარჯზე კი არა, არამედ მუდმივი დენიანი პირველადი.



ნახ. 32. თრპოლუსიანი სინქრონული გენერატორის სქემა.



ნახ. 33.

გრაგნილის (როტორის), მეორადის მიმართ ბრუნვის ხარჯზე. ამ შემთხვევაში მეორად სისტემაში (სტატორის გრაგნილში) ენერგია გადაეცემა გენერატორის ლილვზე მიყვანილი შექანიკური ენერგიის ხარჯზე.

სინუსოიდური დენის მისაღებად, მანქანის კონსტრუქციების დროს ცდილობენ სტატორის და როტორის გრაგნილების ურთიერთგანლაგება მოახდინონ ისე, რომ ბრუნვის დროა ურთიერთინდუქტიობა M იყოს დროის სინუსოიდური ფუნქცია.

როგორც ნახ. 32-დან ჩანს, სტატორის გამტარში აღძრული ე. მ. ძ-ის სრული პერიოდი შეესაბამება მოცემულ გამტართან ორ მეზობელ N და S პოლუსების გავლის დროს. ორ პოლუსიანი როტორის შემთხვევაში ($P=1$) ეს შეესაბამება როტორის ერთი სრული შემობრუნების დროს, $2p$ პოლუსიანი როტორის შემთხვევაში — $\frac{1}{p}$ შემობრუნების დროს. აქედან გამომდინარეობს, რომ აღძრული ე. მ. ძ-ის პერიოდი T ტოლია:

$$T = \frac{60}{n} \cdot \frac{1}{p}, \quad (4,20)$$

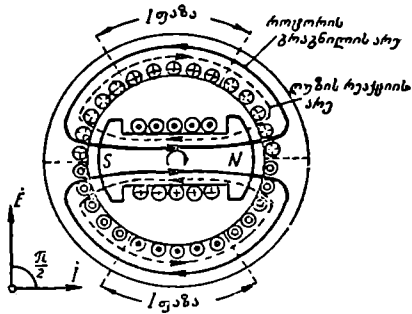
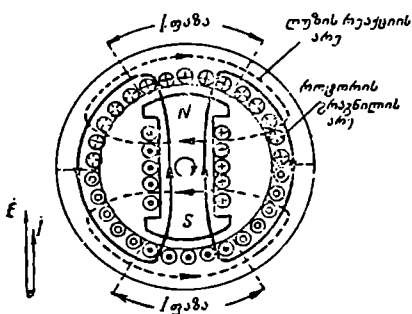
სადაც $\frac{60}{\pi}$ — როტორის ერთი ბრუნვის დროა წამებში.

ამიტომ

$$f = \frac{1}{T} = \frac{p \cdot n}{60} \quad (4,21)$$

ვინაიდან ცალკეულ ფაზების გრაფიკები მიმდევრობით და სიმეტრიულადაა განლაგებული სტატორის წრეხაზზე, ამიტომ მათში აღძრული ე. მ. ძ. ურთიერთ შორის დაძრული იქნება ფაზით $\frac{360^\circ}{m}$ ელექტრული გრადუსით, სადაც m — ფაზების რიცხვია, და შექმნიან m — ფაზათა სიმეტრიულ სისტემას ნახ. 33-ზე ნაჩვენებია ასეთი სისტემის ე. მ. ძ-ების ვექტორები, როდესაც $m = 3$.

როგორც ნახ. 32-დან ჩანს, მანქანის ბრუნვის დროს როტორი არ გა-



ნახ. 34. როტორის გრაგნილის არეს და ლუზის რეაქციის არეს ურთიერთგანლაგება, სტატორის გრაგნილში ე. მ. ძ. და დენის ფაზების თანხვედნის დროს.

ნახ. 35. როტორის გრაგნილის არეს და ლუზის რეაქციის არეს ურთიერთგანლაგება, როდესაც სტატორის გრაგნილში დენი ჩამორჩება ე. მ. ძ.

$\frac{\pi}{2}$ კუთხით.

დამაგნიტდება, ამიტომ მას აკეთებენ მთლიანი მასივისაგან მეტი მექანიკური სიმტკიცისათვის. პირიქით, სტატორის ყოველ წერტილში მაგნიტური არეს ინდუქციის ვექტორი პერიოდულად იცვლის თავის რიცხობრივ მნიშვნელობას და მიმართულებას, ამიტომ გრივალისებური დენებისაგან გამოწვეული დანაკარგების შესამცირებლად სტატორი აიკრიბება იზოლირებული თხელი ფოლადის ფურცლებისაგან.

ყველაზე უფრო მეტი გავრცელება აქვთ სამფაზა სინქრონულ მანქანებს. ერთფაზა სინქრონული მანქანები გაცილებით უფრო იშვიათად იხმარებიან.

სამფაზა სინქრონული გენერატორის სიმეტრიული დატვირთვის დროს სტატორის გრაგნილში მიმდინარეობს სამფაზა დენი, რომელიც, ისევე როგორც ასინქრონულ მანქანაში, ქმნის მბრუნავ მაგნიტურ არეს. სტატორის მაგნიტური არეს ბრუნავის სიჩქარე და მიმართულება ყოველთვის თანხვე-

დრილია მანქანის როტორის ბრუნვის სიჩქარის და მიმართულების, ამიტომ მანქანას სინქრონული ეწოდება.

სტატორის არეს ზემოქმედებას როტორის არეზე უწოდებენ სტატორის რეაქციას ან ლუზის რეაქციას¹.

ლუზის რეაქცია მით უფრო მეტია, რაც მეტია ლუზის (სტატორის) დენი. იგი აგრეთვე დამოკიდებულია სტატორის დენსა და ე. მ. დ. შორის ფაზათა ძვრზე. ეს შეიძლება შევამჩნიოთ ნახ. 34 და 35-ზე.

დაუშვათ, რომ ე. მ. დ. \dot{E} ფაზით თანხვედნილია I დენთან (ნახ. 34). მაშინ, იმ მომენტში, როდესაც როტორი იმყოფება პირველი ფაზის მიმართ ნახ. 34-ზე ნაჩვენებ მდგომარეობაში, ე. მ. დ.-ს და დენს ამ ფაზაში აქვს მაქსიმალური მნიშვნელობა. სტატორის მთელი გრაგნილის მიერ შექნილი არეს ინდუქციური ხაზები, ამ მომენტში გაივლიან როტორის ლერძის განივად (შეადარეთ ნახ. 22-ს) ლუზის რეაქციის არეს ამ შემთხვევაში უწოდებენ განივს.

თუ დენი I ფაზით ჩამორჩება ე. მ. დ.-ს $\frac{\pi}{2}$ კუთხით (ნახ. 35), პირველ ფაზაში დენს ექნება ამპლიტუდური მნიშვნელობა მაშინ, როდესაც ე. მ. დ. მყისა მნიშვნელობა ტოლი იქნება ნულის. დროის ამ მომენტში როტორის ლერძი თანხვედნილი იქნება პირველი ფაზის ლერძთან.

როგორც ნახ. 35-დან ჩანს, ლუზის რეაქციის არეს მიმართულება სივრცეში რჩება ისეთივე, როგორც იყო წინა შემთხვევაში, მხოლოდ ეხლა ინდუქციური ხაზები გადიან როტორის ლერძის გასწვრივ და ამიტომ ლუზის რეაქციის არეს ამ შემთხვევაში უწოდებენ გრძივს.

განხილული მაგალითი გვიჩვენებს, რომ როტორის და სტატორის არეების შეჯამება მნიშვნელოვნად იცვლება სტატორის დენსა და ე. მ. დ. შორის ფაზების ძვრისაგან დამოკიდებულად.

სინქრონული გენერატორის დატვირთვის დროს, ძაბვა მის მომქერებზე ჩვეულებრივ შესაძენევად იცვლება, ვინაიდან ლუზის რეაქცია სცვლის რეზულტიურ მაგნიტურ არეს სტატორის გრაგნილის ხვევებთან ნაკალშებმების რიცხვს, რითაც სცვლის გრაგნილში აღძრული ე. მ. დ.-ს სიდიდეს. დატვირთვის დროს, გენერატორის მომქერებზე ძაბვის უცვლელი სიდიდის შესანარჩუნებლად უნდა ვარეგულიროთ დენი როტორის აგზნების გრაგნილში.

სინქრონული გენერატორის ენერგეტიკული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 36-ზე. მანქანის ლილვთან მიყვანილი მექანიკური სიძღავერე P_1 იხარჯება აგზნების წრედში ჯოულას დანაკარგებზე P_2 . საკისრებში და ჰაერთან ხახუნის დანაკარგებზე P_m , დანაკარგებზე ფოლადში P_e , და P_{μ} ჯოულის დანაკარგებზე სტატორში. ამრიგად გენერატორის სასარგებლო სიძღავერე P_2 ტოლია

$$P_2 = P_1 - P_2 - P_m - P_e - P_{\mu}. \quad (4,22)$$

(4,22) ტოლობა გულისხმობს, რომ როტორის გრაგნილის კვება ხდება, როგორც ეს ხშირად არის, სინქრონული გენერატორის ლილვზე მოთავსებული სპეციალური იმგზნებიდან (მუდმივი დენის მანქანიდან). აგზნების წრედის,

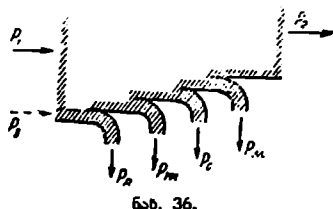
¹ სტატორს ხანდახან უწოდებენ ლუზას, ვინაიდან როტორის პოლუსებისათვის სტატორის ტანი თითქოს წარმოადგენს ლუზას.

მუდმივი დენის დამოუკიდებელი წყაროდან კვების დროს, P_B დანაკარგები დაი-
 ჯარება აგზნების წრედში მიღებული ელექტრული სიმძლავრის ხარჯზე.

ეს შემთხვევა ნახ. 36-ზე ნაჩვენებია პუნქტორით.

ამჟამად სინქრონულ გენერატორებს აგებენ რამდენიმე კილოვატიდან 200 000
 kW-მდე სიმძლავრით, როდესაც სტატორის გრაგნილის ძაბვა აღწევს
 36 kV. $f=50\text{Hz}$ სიხშირისას, რომელიც მიღებულია დასავლეთ ევროპაში და
 სსრკ-ში, (4,21)-ს თანახმად სინქრონულ
 მანქანის ბრუნვის მაქსიმალური სიჩ-
 ქარე ტოლია 3 000 ბრ/წთ. ამერიკის
 შეერთებულ შტატებში იქ მიღებული
 სიხშირისას $f=60\text{Hz}$ ბრუნვის მაქსი-
 მალური სიჩქარე ტოლია 3 600 ბრ/წთ.

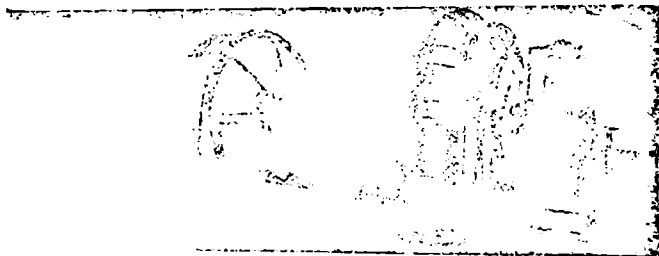
სინქრონული გენერატორის მამ-
 რული ძრავის გვარობის მიხედვით არ-
 ჩევენ: ტურბოგენერატორებს
 (პირველადი ძრავი — ორთქლის



ნახ. 36.

ტურბინა), ჰიდროგენერატორებს (პირველადი ძრავი — ჰიდრო-
 ტურბინა), დიზელგენერატორებს (პირველადი ძრავი — დიზელი).

ტურბოგენერატორები (ნახ. 37) წარმოადგენენ სწრაფმავალ მანქანებს
 და ჩვეულებრივ კეთდება ორი ან ოთხი პოლუსით. პირიქით, ჰიდროგენერა-

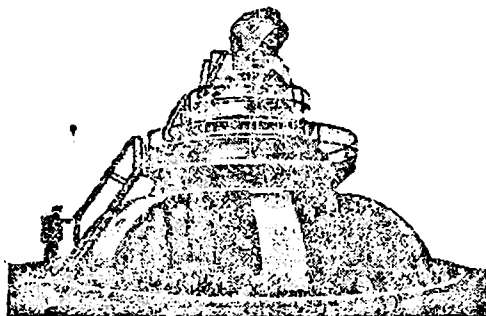


ფიგ. 37. ტურბოგენერატორის საერთო ხედი. მარჯვნივ — ორთქლის ტურბინი —
 მარცხნივ სინქრონული გენერატორი.

ტორები (ნახ. 38) და დიზელგენერატორები არის ნელმავალი მანქანები და
 კეთდება მრავალპოლუსიანები.

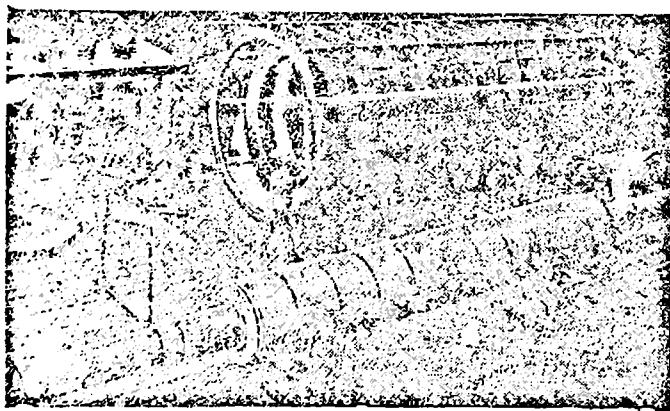
სწრაფმავალი სინქრონული მანქანის (ტურბოგენერატორის) როტორი,
 მეტი მექანიკური გამძლეობისათვის და ჰაერთან ხახუნზე და დანაკარგების
 შესამცირებლად ჩვეულებრივად კეთდება ცილინდრული ფორმის მთლიანი
 ნაქედი ფოლადისაგან (ნახ. 39), მუდმივი დენის გრაგნილის განლაგებისათ-
 ვის მასში ამოიღარება ღრმულები. აგზნების ცალკეული პოლუსები ცილინდ-
 რული როტორის ზედაპირზე არ არის გამოშვებული, ამიტომ ასეთ როტო-
 რებს, ისევე, როგორც მთლიანად მანქანას არა ცხადპოლუსიანებს უწო-
 ლებენ (ნახ. 40).

ტურბოგენერატორებისაგან განსხვავებით ნელშედილი სინქრონული მანქანები, რომლებსაც პოლუსების დიდი რიცხვი აქვს, ატარებენ ცხადპოლუსიანებსა და სახელწოდებას, ვინაიდან ამ მანქანების როტორის ტანზე ცალკეული პოლუსები ცხადად არის გამოშვებული (ნახ. 41).



ნახ. 38. სვირის ჰიდროელექტროსადგურის 30 000 KVA ჰიდროგენერატორის საერთო ხედი.

უკანასკნელ ხანებში დიდ გავრცელებას პოპულობენ სინქრონული ძრავები-მათი ძირითადი უპირატესობა ასინქრონულ ძრავებთან შედარებით გამოიხატება



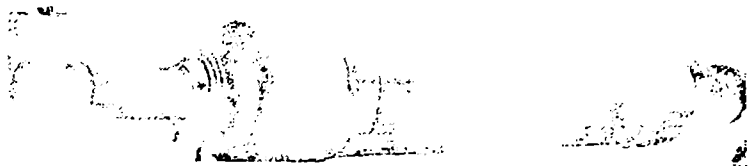
ნახ. 39. 110 000 KVA, 3 000 ბრ/წთ ტურბოგენერატორის საროტორო ნაჭედი.

ტემა იმაში, რომ მათში მაგნიტური არე აიგზნება როტორის მუდმივი დენით და ამიტომ მაგნიტური არეს შესაქმნელად ძრავი არ შთანთქავს ქსელიდან რეაქტიულ დენს. სინქრონულ ძრავებს შეუძლიათ იმუშაონ მაშინაც, როდესაც $\cos \varphi = 1$ ე. ი. როდესაც დენსა და ძაბვას შორის აღილი არა აქვს

უაზების ძერას. სინქრონული ძრავის ნაკლს წარმოადგენს ის, რომ იგი ნორ-
მალურად არ იძლევა ბრუნვის სიჩქარის რეგულირების საშუალებას და მოი-
თხოვს სპეციალურ მოწყობილობებს გაშვებისათვის, რომელთა საშუალებით
ქრავს გაშვებისას თანდათან უმატებთ სიჩქარეს სინქრონულამდე.

ეს საკითხი უფრო დაწვრილებით განხილულ იქნება V ნაწილში.

დ) კოლექტორული მანქანები. კოლექტორი წარმოადგენს ერთმანეთისა-
ვან განმხოლოებულ სპილენძის ფირფიტების რიგს, რომლებიც განლაგებულია

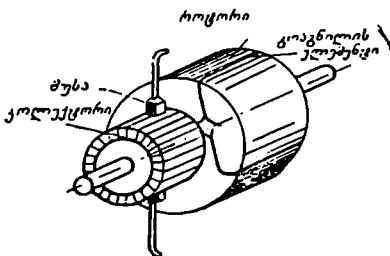


ნახ. 40. ტურბოგენერატორის არაცხადპოლუსიანი როტორის საერთო ხედი.
როტორის გვერდებზე მოსჩაას ვენტილატორები.

ცილინდრულ ზედაპირზე. კოლექტორის ფირფიტები უერთდება მანქანის რო-
ტორის ღრძულეებში მოთავსებულ გრაგნილის ხვევებს. კოლექტორის ზედაპი-
რის გარკვეულ ადგილებზე თავსდება საკონტაქტო მუხები, რომელთა საშუა-



ნახ. 41. სინქრონული მანქანის ცხად-
პოლუსიანი როტორი.



ნახ. 42. როტორის კოლექტორით
(სქემატური გამოსახულება).

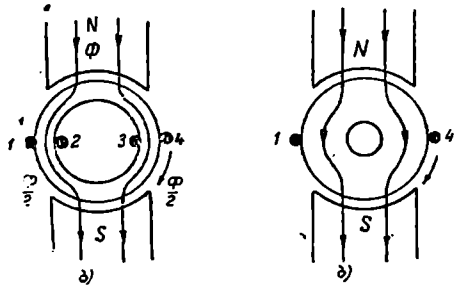
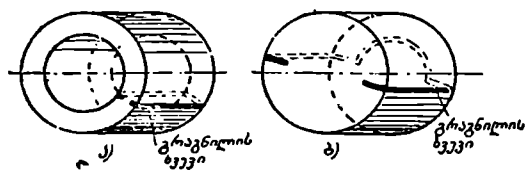
ლებით ხორციელდება რაიმე გარე ელექტრული წრედის შეერთება მბრუნავ
გრაგნილთან. კოლექტორის გამოყენება ელექტრულ მანქანაში, საშუალებას
გვაძლევს მივიანიკოთ მას მთელი რიგი ახალი თვისებებისა; მაგალითად, მივი-
ლოთ მუდმივი დენი ცვლადი ე. მ. ძ. დროს, გარდავექმნათ დენის სიხშირე
და სხვ.,

მანქანებს, რომლებსაც კოლექტორი, კოლექტორული მანქანები
ეწოდება. დენის გვარობის მიხედვით არჩევენ:

ა) მუდმივი დენის კოლექტორული მანქანები და ბ) ცვლადი
დენის კოლექტორული მანქანები.

ვიდრე შევუდგებოდეთ ამ სახის ელექტრული მიანქანების მოკლედ გაცნობას, განვიხილოთ კოლექტორთან შეერთებული გრაგნილის საერთო თვისებები.

მბრუნავი როტორი, რომელზედაც მოთავსებულია გრაგნილი, შეიძლება შესრულებულ იქნას ორ სხვადასხვაგვარად. წინათ როტორი (ლუზა) კეთდებოდა თხელი ფოლადის ფირფიტებისაგან შეკრებილ, დრე უ რ ი ნ დ რ ი ს სახით. ასეთ როტორებს რ გ ო ლ ი ს ე ბ უ რ ი როტორი ეწოდება (ნახ. 43, ა), თუ ასეთ როტორს მოვათავსებთ ელექტრომაგნიტის ორ პოლუსს შორის (ნახ. 43, ბ), მაშინ გრაგნილის ხვევები შებმული იქნება პოლუსის ნაკადის ნახევარძენ, და როტორის ბრუნვის დროს მათში აღიძვრება ე. მ. ძ. ტოლი



ნახ. 43.

რგოლისებური ლუზის (ა) და ორპოლუსიანი, რგოლისებური ლუზის მქონე მანქანის (ბ) სქემები.

ნახ. 44.

დოლისებური ლუზის (ა) და ორპოლუსიანი დოლისებური ლუზის მქონე მანქანის (ბ) სქემები.

ამჟამად რგოლისებური ლუზის ნაცვლად ხმარობენ მხოლოდ ეგრეთწოდებულ დოლისებურ ლუზებს (ნახ. 44, ა) როგორც უფრო ეკონომიურს.

რგოლისებური ლუზის შემდგომ საფეხურს წარმოადგენს დოლისებური ლუზა. თუ რგოლისებურ ლუზაში (ნახ. 43, ბ) მოვსპობთ 2 და 3 გამტარს და ერთმანეთს უშუალოდ შევეერთებთ 1 და 4 გამტარებს, მაშინ ასეთი ხვევი შებმული იქნება პოლუსის მთელ Φ მაგნიტურ ნაკადთან და ლუზის ბრუნვის დროს მისში აღიძვრება ე. მ. ძ. (ნახ. 44, ბ).

$$e_G = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (4,24)$$

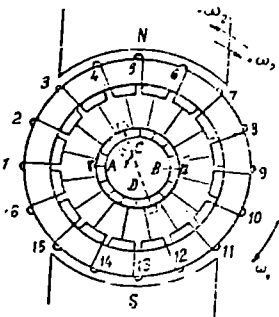
რომელიც რგოლისებური ლუზის 1—2 და 3—4 ხვევებში აღძრული ე. მ. ძ-ის ჯამის ტოლი იქნება:

$$e_G = 2e_{KA} \quad (4,25)$$

ამგვირად, დოლისებური ლუზა საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ იგივე ე. მ. ძ., რაც რგოლისებურ ლუზაში, გამტარი მასალის თითქმის ორჯერ ნაკლები ხარჯის დროს.

განვიხილოთ რგოლისებური (ნახაზის უფრო მეტი თვალსაჩინოებისათვის)

ლუზა (ნახ. 45), რომელსაც აქვს მაგალითად 16 ხვევი, მიერთებული კოლექტორის 16 ფირფიტასთან. ლუზა ბრუნავს სივრცეში უძრავ $N-S$ პოლუსს შორის, მუდმივი კუთხური სიჩქარით ω_1 . საერთო შემთხვევაში, ყოველ ხვევში აღძრული ე. მ. დ. შეიძლება იქოს არასინუსოიდური. განვიხილოთ ამ ე. მ. დ. პირველი ჰარმონიკი. გრაგნილის ყველა ხვევების ე. მ. დ. ვექტორული დიაგრამა წარმოადგენს 16 სხივიან ვარსკვლავს სხივებშორის $\frac{2\pi}{16}$ ფაზური კუთხით.

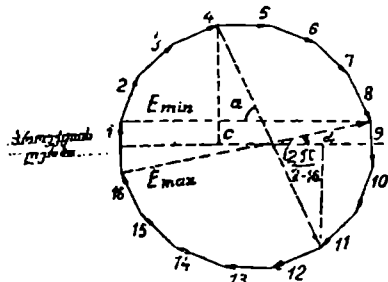


ნახ. 45. რგოლური ლუზა კოლექტორით.

თუ ყველა ამ ე. მ. დ. გეომეტრიულად შევაჯამებთ, მივიღებთ შეკრულ სწორ 16-კუთხედს (ნახ. 46). მაშასადამე, ყველა მიმდევრობით შეერთებული ხვევების ე. მ. დ. ჯამი ტოლია ნულის და მათი ზემოქმედებით გრაგნილში არ აღიძვრება დენი.

თუ პოლუსების ღერძის პერპენდიკულარულ სიბრტყეში, კოლექტორზე მოვათავსებთ A და B მუსებს (ნახ. 45), მაშინ ძაბვა მათ შორის ტოლი იქნება კოლექტორის ფირფიტების საშუალებით ამ მუსებთან მიერთებულ ხვევების ე. მ. დ. მყისა მნიშვნელობების ჯამის.

ნახ. 45-ზე წარმოდგენილ დროის მომენტში, 1 და 9 ხვევებში ე. მ. დ.-ის მყისა მნიშვნელობანი ნულის ტოლია და ამიტომ A და B მუსებს შორის მოქმედებს ე. მ. დ., ტოლი (ნახ. 46)



ნახ. 46. ნახ. 45-ზე გამოსახული ლუზის ხვევებში აღძრული ე. მ. დ.-ის ვექტორული დიაგრამა.

$$\sum_{1}^{8} e = \sum_{10}^{16} e = E_{min}. \quad (4,26)$$

$\frac{\pi}{16}$ კუთხით ლუზის ნობრუნების დროს 1 და 9 ხვევში ე. მ. დ.-ების მყისა მნიშვნელობა არ იქნება ნულის ტოლი და A და B მუსებს შორის აღიძვრება ძაბვა

$$\sum_{1}^{8} e = \sum_{9}^{16} e = E_{max} \quad (4,27)$$

ლუზის შემდგომი ნობრუნების დროს ძაბვა მუსებს შორის ირყევა ზღვრებში E_{max} -დან E_{min} -მდე (ნახ. 47), აქვს რა საშუალო მნიშვნელობა

$$E_{cp} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2} \quad (4,28)$$

ნახ. 46-დან გამომდინარეობს, რომ

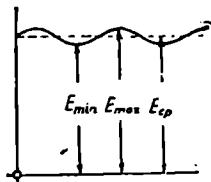
$$\frac{E_{\min}}{E_{\max}} = \cos \frac{\pi}{N_k}, \quad (4,29)$$

სადაც N_k —კოლექტორის ფირფიტების რიცხვია.

ინისათვის, რომ ძაბვის პულსაცია მუსებზე არ იყოს დიდი, N_k კოლექტორის ფირფიტების რიცხვს შეარჩევნ საკმარისად დიდს. მაშასადამე, როტორი კოლექტორიანი გრავნილით, მისი მუდმივ მაგნიტურ არეში ბრუნვის დროს საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ პრაქტიკულად მუდმივი ძაბვა. ამ თვალსაზრისით ამბობენ, რომ კოლექტორის დახმარებით შეიძლება „გაემართოთ“, როტორის გრავნილში აღძრული ცვლადი ე. მ. ძ.

გადავადგილოთ მუსები კოლექტორზე α კუთხით CD მდგომარეობაში (ნახ. 45) ამ მდგომარეობაში ხვევები 4 და 12 მუსებით იქნება ჩართული მოკლედ. ძაბვა მუსებს შორის ტოლი იქნება (ნახ. 46).

$$\sum_5^{11} e = E \cdot cd = E_{\min} \cdot \cos \alpha. \quad (4,30)$$



ნახ. 47. მუსებს შორის ძაბვის (ე. მ. ძ.) პულსაცია.

მუსების $\alpha = 90^\circ$ კუთხით მობრუნების დროს ძაბვა მათ შორის ნულის ტოლი იქნება. ამგვარად, ვხედავთ, რომ კოლექტორზე მუსების გადაადგილებით შეიძლება მათ შორის მოკმედი მუდმივი ძაბვის რეგულირება ნულიდან E_{cp} მნიშვნელობამდე.

თუ მუსებს მოვთავსებთ უძრავად AB მდგომარეობაში და ერთდროულად, როტორთან ვაბრუნებთ პოლუსებს ω_2 მუდმივი კუთხური სიჩქარით (ნახ. 45), მაშინ ძაბვა მუსებს შორის დროის მიხედვით შეიცვლება სინუსოიდურად

$$e = E_{cp} \sin \omega_2 t, \quad (4,31)$$

ვინაიდან პოლუსების ბრუნვა კოლექტორზე მუსების გადაადგილების ტოლფასია.

უძრავი პოლუსების შემთხვევაში ე. მ. ძ-ის სიხშირე როტორში ტოლი იქნება

$$f_R = \frac{\omega_1}{2\pi}, \quad (4,32)$$

ზოლო პოლუსების $\pm \omega_2$ კუთხური სიჩქარით ბრუნვის დროს

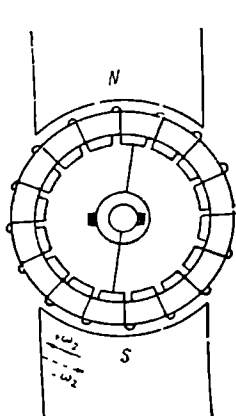
$$f_R = \frac{\omega_1 \mp \omega_2}{2\pi}. \quad (4,33)$$

ამასთან მუსებზე ძაბვის სიხშირე ტოლი იქნება:

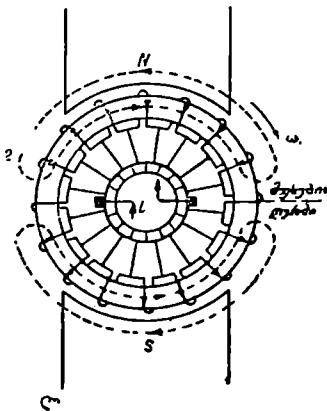
$$f_k = \omega_2 : 2\pi, \quad (4,34)$$

მაშასადამე, თუ ვაბრუნებთ კოლექტორიან როტორს მბრუნავ მაგნიტურ არეში, შეიძლება მიღებულ იქნას როტორის გრაგნილში f_R სიხშირის ე. მ. დ. და ერთდროულად კოლექტორზე f_K სიხშირის ე. მ. დ. ამ პრინციპზეა დაშვარებული სიხშირის გარდაქმნა.

რომ გამოვიყენოთ როტორის გრაგნილში აღძრული f_R სიხშირის ე. მ. დ. უკანასკნელი გამოყვანილ უნდა იქნას კოლექტორის გარეშე აგრეთვე საკონ-



ნახ. 48. სიხშირის გარდასახვის სქემა.



ნახ. 49.

ტაქტო რგოლებზე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 48-ზე ერთფაზა დენისათვის (ამ ნახაზზე სიცხადისათვის კოლექტორი არ არის გამოსახული).

კოლექტორს აქვს კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი თვისება; იგი საშუალებას გვაძლევს როტორის მბრუნავი გრაგნილის მაგნიტური არე გავხადოთ სივრცეში უძრავი.

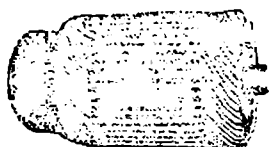
დაეუშვათ (ნახ. 49), რომ მბრუნავი როტორის გრაგნილში კოლექტორზე უძრავად მოთავსებული მუსების საშუალებით გადის i დენი, როგორც ნახ. 49-დან ჩანს, როტორის უძრაობის ან ბრუნვისაგან დამოუკიდებლად, დენის მიმართულება, მუსების ერთ და მეორე მხარეს მოთავსებულ გამტარებში, იქნება უცვლელი და ამიტომ პუნქტირით ნაჩვენები მაგნიტური არე, ხისტად იქნება ფიქსირებული სივრცეში. თუ i დენი იქნება ცვლადი, მაშინ მაგნიტური არე უკლებლად დროის მიხედვით, მაგრამ მისი სივრცითი განაწილება დარჩება უცვლელი.

კოლექტორული მანქანების მუშაობაზე არსებით გავლენას ახდენს დენის კომუტაციის პროცესი. ნახ. 49-დან სჩანს, რომ გრაგნილის ყოველ ხვევაში მუსის კონტაქტთან მისი შეხების მომენტში (16 მდგომარეობიდან 2 მდგომარეობაში გადასვლის დროს) დენის მიმართულება იცვლება. ამ დროს ხვევაში აღიძვრება თვითინდუქციის ე. მ. დ., რომელიც ჯამდება რა გარე არეს

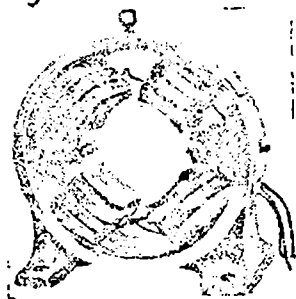
მიერ აღძრულ ე. მ. ძ-თან, ხვევში იწვევს დენს, რომელიც შეიკვრება მუსის კონტაქტის საშუალებით. ამ დენის საკმაოდ დიდი მნიშვნელობის დროს მუსის კონტაქტი იწყებს ძლიერ ნაპერკკლიანობა და ხდება მუსების და კოლექტორის შემოწვა.

მუსების ნაოწკლიანობის თავიდან ასაცილებლად, ქმნიან რა კომუტაციის ზონაში დამატებით მაგნიტურ არეს, მოკლედ შერთულ ხვევში აკომპენსირებენ e_k ე. მ. ძ-ს. ამ არეს ისე გაიანგარიშებენ, რომ მის მიერ ხვევში აღძრული ე. მ. ძ. $e = -e_k$.

1. მუდმივი დენის მანქანებში. ამჟამად მუდმივი დენის მანქანები აიგება თითქმის მხოლოდ კოლექტორული ტიპის. ჩვეულებრივად ასეთი მან-



ნახ. 50. მუდმივი დენის მანქანის ლუხა კოლექტორით.



ნახ. 51. მუდმივი დენის სადგარი პოლუსებით.

ქანა შედგება როგორისაგან (ლუხისაგან), რომელსაც აქვს კოლექტორზე გამოყვანილი გრაგნილი (ნახ. 50), და ცხადპოლუსიანი სტატორისაგან სადგარისაგან, (ნახ. 51) რომელზედაც მოთავსებულია აგზნების გრაგნილი.

ამგვარად, მუდმივი დენის მანქანა წარმოადგენს მბრუნავ ლუხიან სინქრონული მანქანისა და კოლექტორის გაერთიანებას.

როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები ასეთი მანქანის როტორის გარეშე ძრავით, მუდმივი სიჩქარით ბრუნვისას კოლექტორის მუსებზე აღიძვრება პრაქტიკულად დროის მიხედვით უცვლელი ძაბვა, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას გარე წრედის დენით კვებისათვის. ასეთი მანქანა წარმოადგენს მუდმივი დენის გენერატორს.

თუ პირიქით კოლექტორის მუსებს მიუერთებთ მუდმივი დენის წყაროს, მაშინ ლუხის გრაგნილში გაივლის დენი, რომელიც ურთიერთქმედებს რა სტატორის მაგნიტურ არესთან, ქმნის მაბრუნ მომენტს. ეს მომენტი გამოიყენება სასარგებლო მექანიკური მუშაობის შესასრულებლად. შექცევადობის საერთო პრინციპის შესაბამისად მანქანა ამ შემთხვევაში იმუშავებს როგორც მუდმივი დენის ძრავი.

სიმძლავრისა და სწრაფმავლობის მიხედვით მუდმივი დენის მანქანის პოლუსების რიცხვი ირყევა ორიდან რამდენიმე ათეულამდე. ნელმავალი და დიდი სიმძლავრის მანქანები კეთდება მრავალპოლუსიანი (ნახ. 52).

მუდმივი დენის მანქანებში მათი გენერატორად მუშაობის დროს გამოიყენება თვით აგზნების პრინციპი.

დაეუშვათ (ნახ. 53, ა), რომ გენერატორის აგზნების გრაგნილი მიერ-

თებულთა თვით მანქანის მუსებთან. თუ დავიწყებთ მანქანის ბრუნვას, მაშინ პოლუსების ნარჩი არეს შემთხვევაში კოლექტორის მუსებზე აღიძვრება მცირე ძაბვა, რომელიც აგზნების გრაგნილის შესაბამისად ჩართვის დროს, ან გრაგნილში გამოიწვევს i_m დენს, რომელიც აძლიერებს პოლუსების ძა ნარჩ ნაკადს. ძაბვა მუსებზე გაიზრდება უფრო მეტად, და ასე გაგრძელდება მანამდე, სანამ არ მოხდება გენერატორის მთლიანი თვითაღზნება.

აგზნების გრაგნილის კოლექტორის მუსებთან შერთების მიხედვით არჩევენ: ა) მანქანები პარალელური (შუტური) აგზნებით (ნახ. 53, ა), ბ) მანქანები მიმდევრობითი (სერიესული) აგზნებით (ნახ. 53, ბ), გ) მანქანები შერეული (კომპაუნდური) აგზნებით (ნახ. 53, გ), დ) მანქანები დამოუკიდებელი აგზნებით (ნახ. 53, დ).

გენერატორის E ე. მ. ძ-სა და მის მომჭერებზე (მუსებზე), U ძაბვას შორის არსებობს შემდეგი დამოკიდებულება

$$E - Ir = U, \quad (4,35)$$

სადაც I —დენია ლუზის გრაგნილში, r —მისი წინაღობა.

მეორე მხრივ E ე. მ. ძ დაკავშირებულია, მაგნიტურ ნაკადთან მანქანის საჭერო შუალედში და ლუზის ბრუნვის სიჩქარესთან n , ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კახონიდან გამომდინარე უბრალო დამოკიდებულებით:

$$E = k\Phi n, \quad (4,36)$$

სადაც k არის პროპორციულობის კოეფიციენტი.

(4,35) და (4,36)-დან ვპოულობთ:

$$k\Phi n - Ir = U. \quad (4,37)$$

ამ ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ მულმივი დენის გენერატორის თვისებები არსებითად არის დამოკიდებული პოლუსების აგზნების ხერხზე, ენაიდან, როგორც, ეს ჩანს ნახ. 53-დან მაგნიტური ნაკადი Φ , აგზნების სხვადასხვა სქემის დროს, სხვადასხვანაირად იცვლება გენერატორის I დენის ცვლილებისას.

გენერატორის დატვირთვის დროს ლუზის გრაგნილში გამავალი დენი ქმნის მაგნიტურ არეს (ნახ. 49), რომელიც ემთხვევა რა პოლუსების არეს, სცელის ლუზის გრაგნილთან შებმულ დ საერთო ნაკადს. ეს მოვლენა, ისევე როგორც სინქრონულ მანქანებში, ატარებს ლუზის რეაქციის სახელწოდებას. როგორც (4,37) ტოლობიდან ჩანს, ლუზის რეაქცია, ცელის რა Φ ნაკადს, მოქმედებს ძაბვაზე მულმივი დენის გენერატორის მომჭერებზე. გენერა-



ნახ. 52. დიდი სიმძლავრის მულმივი დენის მრავალპოლუსიანი მანქანა.

ტორის ძაბვის რეგულირება ხორციელდება დენის ცვლით აგზნების გრაფ-ნილში.

მულმივი დენის მანქანის ძრავად მუშაობის შემთხვევაში ე. მ. ძ. და ძაბ-ვა ერთმანეთთან დაკავშირებული არიან შემდეგი თანაფარდობით:

$$U - Ir = E. \quad (4,38)$$

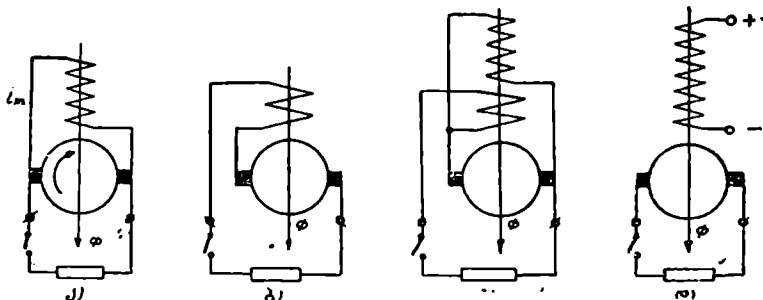
აქ E ძაბვის მდგენელია, რომელიც აწონასწორებს ლუზის ე. მ. ძ.-ს. (4,36 და 4,38) ტოლობიდან გამომდინარეობს

$$n = \frac{U - Ir}{k\Phi} \approx \frac{U}{k\Phi} \quad (4,39)$$

და ბრუნვის მომენტი

$$M \equiv \frac{EI}{n} \equiv \Phi I. \quad (4,40)$$

ეს ტოლობები გვიჩვენებენ, რომ აგზნების ხერხი მნიშვნელოვნად მოქ-მედებს ძრავის მუშა თვისებებზე. ასე, მაგალითად, პარალელური აგზნების



ნახ. 53. მულმივი დენის მანქანების სქემები: ა) პარალელური აგზნებით, ბ) მიმდევრობითი აგზნებით, გ) შერეული აგზნებით, დ) დამოუკიდებელი აგზნებით.

დროს Φ მაგნიტური ნაკადი დატვირთვისას მცირედ იცვლება, ძრავის ბრუნ-ვის სიჩქარე თითქმის მულმივი რჩება, ხოლო ბრუნვის მომენტი დენის პირ-დაპირ პროპორციულად იზრდება. პირიქით, მიმდევრობითი აგზნების დროს I დენის გაზრდისას, გაიზრდება Φ ნაკადი და ამიტომ ძრავის ბრუნვის სიჩქარე მკვეთრად ეცემა, ხოლო მომენტი იზრდება I დენის თითქმის კვადრატის პროპორციულად. ამის შესაბამისად მულმივი და ცვლადი დენის ძრავებს, რომლებიც დატვირთვისას მცირედ იცვლიან ბრუნვის სიჩქარეს, უწოდებენ ძრავებს სიჩქარის მულმივი ან ცვლადი ბრუნვის სიჩქარე დატვირთვისას მკვეთრად ეცემა უწოდებენ ძრავებს სიჩქარის სერიესული მახასიათებლით.

მუდმივი დენის ძრავის გაშვებისას, როდესაც $n=0$ ლუზის ე. მ. ძ. ასევე ნულის ტოლია ($E=0$) და, (4,38) ტოლობის შესაბამისად,

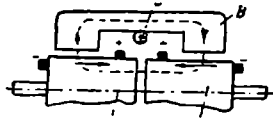
$$I = \frac{U-E}{r} = \frac{U}{r} \quad (4,41)$$

დიდი გაშვების დენების თავიდან ასაცილებლად გაშვებისას ლუზის წრედში მიმდევრობით ჩაირთვება დენის შემზღუდავი წინააღმდეგობა R , ეგრეთწოდებული გამშვები რეოსტატი. ამ პირობებში

$$I = \frac{U}{r+R}$$

ძრავის ბრუნვათა რიცხვის გაზრდასთან ერთად იზრდება ლუზის ე. მ. ძ., I დენი მცირდება და R წინააღმდეგობასთან დათან გამორთავენ.

მუდმივი დენის ძაბვების სიჩქარის რეგულირება ხორციელდება აგზნების დენის შეცვლით (Φ ნაკადის) ან მოშვებებზე U ძაბვის შეცვლით. ასეთი რეგულირების შესაძლებლობა გამომდინარეობს (4,39) ტოლობიდან.



ნახ. 54.

მუდმივი დენის ძრავებში ფართო გავრცელება პპოვეს ყველა იმ დანადგარებში, სადაც მოითხოვება სიჩქარის მდოგრე და ეკონომიური რეგულირება ფართო ზღვრებში. გარდა ზემოთ განხილული მუდმივი დენის კოლექტორული მანქანებისა, არსებობს კიდევ ეგრეთწოდებული მუდმივი დენის უნიპოლარული მანქანები. ასეთი მანქანების ერთ-ერთი სახეობის მოწყობის პრინციპი ნაჩვენებია ნახ. 54-ზე. შეწყვილებული მასიური ლუზა A_1A_2 ბრუნავს C აგზნების გრაგნილის მქონე B სადგურის შიგნით. თვითეული ლუზის გარშემოწერილობის გასწვრივ მაგნიტური არეს ინდუქციის ვექტორის მიმართულება რჩება უცვლელი (არ არის N და S პოლუსების მონაცვლეობა) ლუზის ბრუნვისას მის ტანში აღიძვრება ე. მ. ძ. და მუსკებზე, რომლებიც მოთავსებულია უშუალოდ ლუზის ზედაპირზე წარმოიშვება ძაბვა. A_1 და A_2 ლუზების მუსების ჯგუფები შეიძლება ჩაირთოს მიმდევრობით და პარალელურად. უნიპოლარული მანქანები გამოიყენება შედარებით იშვიათად და, უმთავრესად, დიდი დენების მისაღებად დაბალი ძაბვის დროს ($5-10$ V.).

უნიპოლარულ მანქანებს არა აქვს კოლექტორი, მაგრამ მის მაგივრად აქვს სრიალა მუსის კონტაქტი, რომელიც ფარული სახით წარმოადგენს იგივე კოლექტორს, ვინაიდან კოლექტორის გარეშე პრინციპიალურად შეუძლებელია მუდმივი დენის განუწყვეტლივ მიღება.

ეს გამომდინარეობს ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონიდან $\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$.

უწყვეტ და უცვლელ კონტურში ϵ ძაბვა შეიძლება მუდმივი იყოს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც მაგნიტური ნაკადი ამ კონტურის შიგნით განუწყვე-

ტლივ თანაბრად იზრდება ან მცირდება, რაც ეწინააღმდეგება ჩვენს ძირითად ფიზიკურ წარმოდგენებს.

2. ცვლადი დენის კოლექტორული მანქანები. ერთფაზა და სამფაზა დენის კოლექტორული მანქანები გამოიყენებიან თითქმის მხოლოდ ძრავებად ან დამხმარე მანქანებად, სამფაზა დენის ასინქრონული ძრავის ბრუნვის სიჩქარის და სიმძლავრის კოეფიციენტის რეგულირებისათვის (სიხშირის გარდამსახები და ამგზნებები).

ცვლადი დენის კოლექტორული ძრავები, არიან რა ასინქრონულნი, უკოლექტორო ასინქრონულ მანქანებისაგან განსხვავებით უშვებენ ბრუნვის სიჩქარის რეგულირებას ფართო ზღვრებში და ხშირ შემთხვევაში სიმძლავრის კოეფიციენტის ერთდროულ რეგულირებას. მაგრამ, მიუხედავად ამისა, ცვლადი დენის კოლექტორული მანქანები შედარებით მცირედ არის გავრცელებული. ეს აიხსნება მათი შედარებით მაღალი ღირებულებით და დენის კომუტაციასთან დაკავშირებული სიძნელებით.

უფრო დაწვრილებით, კოლექტორული ძრავების მოწყობილობა განხილული იქნება ამ წიგნის მეორე ნაწილში.

ე) კავშირი ელექტრული მანქანის სიმძლავრესა და მის გეომეტრიულ ზომებს შორის. ელექტრული მანქანის შინაგანი ელექტრომაგნიტური სიმძლავრე P პროპორციულია I დენის ნამრავლისა მისი გრაგნილის E . ე.მ. დ. ხე:

$$P \equiv IE. \quad (4,42)$$

დენის მოცემული სიხშირისა და მანქანის ბრუნვის სიჩქარის დროს E ე. მ. დ. გრაგნილის ω ხვევების რიცხვის და მათთან შემზღული Φ მაგნიტური ნაკადის პროპორციულია:

$$E \equiv \omega \Phi, \quad (4,43)$$

ამიტომ

$$E \equiv \omega BS_e, \quad (4,44)$$

სადაც B — მაგნიტური ინდუქციის საშუალო მნიშვნელობაა ხვევებით გარემოცული S_e ფართობის ზღვრებში.

დენი $I = \Delta S_n$, სადაც Δ — დენის სიმკვრივეა, S_n — გამტარის კვეთი.

ამიტომ (4,42)-ის მაგივრად შეიძლება დაიწეროს

$$P \equiv \Delta S_n \omega BS_e. \quad (4,45)$$

აღნიშნოთ ყველა ხვევების სპილენძის საერთო კვეთი:

$$S_M = s_n \omega, \quad (4,46)$$

$$P \equiv \Delta BS_e S_M \quad (4,47)$$

თუ განვიხილავთ მზარდი სიმძლავრის მანქანების რიგს, რომლებსაც აქვთ მსგავსი გეომეტრიული ფორმები, ერთნაირი დენის სიმკვრივე და ინდუქცია, მაშინ (4,47)-ს საფუძველზე შეიძლება თქმა, რომ

$$P \equiv I^2, \quad (4,48)$$

თუ L -ით აღვნიშნავთ მანქანის ხაზურ ზომებს, ვინაიდან

$$S_e S_M \equiv l^2 \equiv I^2.$$

(4,48) შეიძლება აგრეთვე დაიწეროს შემდეგი სახით:

$$I \equiv \sqrt[4]{P} \quad (4,49)$$

მაშასადამე, მსგავსი, მზარდი სიმძლავრის მანქანების რიგისათვის ხაზური ზომები იცვლება სიმძლავრიდან მეოთხე ხარისხის ფესვის პროპორციულად.

ამ კანონიდან, რომელიც განსაზღვრავს კაეზირს ელექტრული მანქანის სიმძლავრესა და მის გეომეტრიულ ზომებს შორის, შეიძლება გაკეთდეს რიგი მნიშვნელოვანი დასკვნებისა.

აქტიური მასალების (სპილენძის და ფოლადის) წონები— G პროპორციულია მათი მოცულობისა, ე. ი. ხაზური ზომების კუბის, ამიტომ მსგავსი მანქანების რიგისათვის

$$G \equiv \sqrt[4]{P^3} \quad (4,50)$$

შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ მანქანის აქტიური მასალების ღირებულება C და P_w დანაკარგები მათში, მოცემული ინდუქციისა და დენის სიმკვრივის დროს, აგრეთვე პროპორციულია წონისა.

მაშასადამე:

$$C \equiv \sqrt{P^3} \quad (4,51)$$

და

$$P_w \equiv \sqrt{P^3} \quad (4,52)$$

მეტად დამახასიათებელია წონა და ღირებულება, აღებული მანქანის სიმძლავრის ერთეულზე. (4,50) და (4,51)-დან მივიღებთ

$$\frac{G}{P} \equiv \frac{C}{P} \equiv \frac{\sqrt[4]{P^3}}{P} \equiv \frac{1}{\sqrt[4]{P}} \quad (4,53)$$

მაშასადამე, მსგავსი მანქანების რიგისათვის 1kVA ან 1kW სიმძლავრეზე მოსული წონა და ღირებულება იცვლება მათი სიმძლავრიდან მეოთხე ხარისხის ფესვის უკუპროპორციულად.

ასეთივე დამოკიდებულება მიიღება ელექტრულ მანქანაში, დანაკარგებისათვის, რომელიც გამოსახულია პროცენტებში ნომინალური სიმძლავრიდან:

$$\frac{P_w}{P} \equiv \frac{\sqrt[4]{P^3}}{P} \equiv \frac{1}{\sqrt[4]{P}}. \quad (4,54)$$

(4,53) და (4,54)-დან გამომდინარეობს, რომ რამდენიმე მანქანის საერთო წონა, ღირებულება და დანაკარგები ყოველთვის მეტია იგივე ჯამური სიმძლავრის მქონე ერთი მანქანის წონაზე, ღირებულებაზე და დანაკარგებზე.

ამით აიხსნება ტენდენცია თანამედროვე ელექტრულ დანადგარებში, იქ, სადაც ეს შესაძლებელია და მიზანშეწონილი გამოყენებულ იქნას, დიდი სიმძლავრის მანქანები ივივე ჯამური სიმძლავრის რამდენიმე მცირე მანქანის მაგივრად.

როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები დანაკარგები ელექტრულ მანქანებში იზრდება ხაზური ზომების კუბის პროპორციულად, მაშინ როდესაც გაცივების ზედაპირები იზრდება მხოლოდ კვადრატულ დამოკიდებულებაში. ამიტომ მსგავს მანქანების რიგში სიმძლავრის ზრდასთან ერთად გაცივების პირობები უარესდება. ამასთან დაკავშირებით ხშირად გვიხდება მათი ფორმების გეომეტრიულ მსგავსებიდან უკან დახევა და სიმძლავრის ზრდასთან ერთად მანქანის გაცივების ინტენსივობის გაზრდა.

მსგავს, მზარდი სიმძლავრის მანქანების რიგში მათი ბრუნვის სიჩქარე რჩება მუდმივი, ამიტომ მაბრუნე მომენტი M პროპორციულია სიმძლავრის:

$$M \equiv P \equiv I^3. \quad (4,55)$$

თუ განვიხილავთ ერთი და იგივე ტიპის მანქანებს განსხვავებული n ბრუნვათა რიცხვით წუთში, მაშინ მათი სიმძლავრე პროპორციული იქნება

$$P \equiv M n \equiv I^3 n \quad (4,56)$$

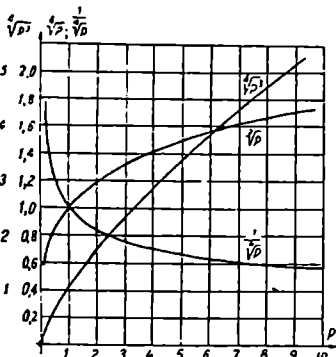
და ხაზური ზომები

$$l \equiv \sqrt[4]{\frac{P}{n}} \quad (4,57)$$

მაშასადამე ერთნაირი ზომების და B და Δ ელექტრომაგნიტური დატვირთვისას, მანქანის სიმძლავრე (4,56) ტოლობის თანახმად, დაახლოებით პროპორციულია n ბრუნვის სიჩქარის.

ელექტრული მანქანების მზარდი სიმძლავრის ზემოთ მოყვანილი კანონები პრაქტიკაში არ არის ზუსტად დაცული, ვინაიდან სიმძლავრის ზრდისას კონსტრუქციული და სხვა მიზეზების გამო ყოველთვის გვიხდება მანქანის ფორმების გეომეტრიული მსგავსებიდან გადახევა, მაგრამ ეს კანონები საკმაოდ კარგად აღმოგვცემენ წონების, დანაკარგების და ღირებულების მაჩვენებლების შეცვლის ტენდენციებს და ამიტომ მათ აქვთ დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა.

ნახ. 55-ზე მოყვანილია სიმძლავრის ზრდის მიხედვით მანქანის მაჩვენებლების ცვლილების დამახასიათებელი მრუდები, რომლებიც აგებულია არიან ამ პარაგრაფში მოყვანილი დამოკიდებულებების საფუძველზე. ამ მრუ-



ნახ. 55. ელექტრული მანქანის ფარდობითი ნაჩვენებლების ცვლილება სიმძლავრისაგან დამოკიდებულებით.

დებში მოცემული სიმძლავრის მანქანის მაჩვენებლები, რომელთანაც ხდება შედარება, მიღებულია ერთის ტოლად.

5. ელექტრული მანქანების მიმართ გამომყვამებული თვითგადაცემის ძირითადი კანონები

ელექტრულ მანქანებში ენერჯის დაკარგვა იწვევს მისი ცალკეული ნაწილების გახურებას. ხშირებული განმამხოლოებელი მასალების არასაკმარის-

სი თბომდგრადობა, გვაიძულებს მანქანების გაანგარიშების და მათი ექსპლოატაციის დროს თვალუური ვადევენოთ, რომ მანქანის ცალკეული ნაწილების გახურების ტემპერატურა არ აღემატებოდეს მათთვის დასაშვებ და უსაფრთხო მნიშვნელობებს.

ამ პირობებში ელექტრული მანქანების გაცივების პრობლემას დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა ენიჭება და მანქანების შესწავლის დროს განხილულ უნდა იქნას ელექტრომაგნიტურ და მექანიკურ პროცესებთან ერთად, რომლებსაც ადგილი აქვთ მათში.

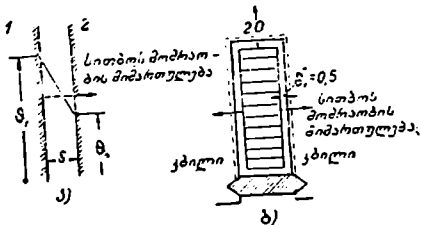
ელექტრული მანქანების გაცივება მჭიდროდაა დაკავშირებული მათ კონსტრუქციულ შესრულებასთან, ამიტომ გაცივების საკითხების კონსტრუქციული გადაწყვეტა განხილული იქნება წინამდებარე კურსის შემდგომ თავებში, ელექტრული მანქანების შესაბამისი ტიპების კონსტრუქციების აღწერის დროს. იქვე იქნება განხილული დაუმყარებელი თბური პროცესები, რომლებიც წარმოიშობა ელექტრულ მანქანებში მათი ცვალებადი დატვირთვის დროს.

ქვემოთ ჩვენ დავკმაყოფილებით თბოგადაცემის ძირითადი კანონების გადმოცემით, რომლებიც საშუალებას გვაძლევს ხარისხობრივად და რაოდენობრივად გამოვიკვლიოთ ელექტრული მანქანის თბური არე და განვსაზღვროთ სითბოს რაოდენობა, რომელიც გადაეცემა გარემოს მანქანის გახურებულ ზედაპირებიდან.

ა) თბოგადაცემა თბოგამტარობის გზით. განვიხილოთ დამყარებული თბური პროცესი მანქანაში, როდესაც მისი ცალკეული ნაწილების ტემპერატურა არ იცვლება და როდესაც მანქანის შიგნით დანაკარგების სახით გამოყოფილი სითბო, მისი გაცივების გარე ზედაპირების საშუალებით გარეთ გადაცემული სითბოს ტოლია.

დავუშვათ, რომ მანქანის 1 და 2 ნაწილებს შორის (ნახ. 56, ა) დამყარდა ტემპერატურათა მუდმივი სხვაობა $\vartheta_1 - \vartheta_2$ და გვაქვს თანაბარი თბური არე. ამ შემთხვევაში 1 და 2 ნაწილებს შორის თბური ნაკადი ტოლია

$$Q = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R_{\vartheta}} W, \quad (5,1)$$



ნახ. 56. სითბოს გადაცემა თბოგამტარობის გზით.

სადაც R_{ϑ} — 1 და 2 ნაწილებს შორის შუალედი გარემოს თბური წინააღმდეგობაა, და გაიზომება $^{\circ}C/W$.

თანაბარი თბური არე შემთხვევაში

$$R_{\vartheta} = p_{\vartheta} \frac{\delta}{s} = \frac{\delta}{s \lambda_{\vartheta}}, \quad (5,2)$$

სადაც δ — შუალედი გარემოს სისქეა, რომელიც თანაბარი არეს შემთხვევაში შემოფარგლულია ორი პარალელური სიბრტყით, s — მისი განივი კვეთია $F_{\vartheta} = \frac{1}{\lambda_{\vartheta}}$ — ხვედრითი თბური წინააღმდეგობა, λ_{ϑ} — ხვედრითი თბოგამტარობა, თუ δ — ს

გავზომავეთ cm -ში, $\epsilon - cm^2$ -ში, მაშინ ρ უნდა გაიზომოს $^{\circ}Ccm/W$ -ში და $\lambda, — W/^{\circ}Ccm$. (5,1) და (5,2) ტოლობების შესაბამისად შუალედი გარემოს ზღვრებ-
ში ტემპერატურა იცვლება სწორი ხაზის კანონით.

თუ შუალედი გარემო არაერთგვაროვანია და შედგება სხვადასხვა ხვედ-
რითი თბოგამტარობის n ფენისაგან, მაშინ ჯამური თბური წინააღმდეგობა
ტოლი იქნება ცალკეულ ფენების წინააღმდეგობების ჯამის:

$$R_{\Sigma} = R_{\Sigma 1} + R_{\Sigma 2} + \dots + R_{\Sigma n} \quad (5,3)$$

ხვედრითი თბური წინააღმდეგობების მნიშვნელობები ზოგიერთი მასა-
ლებისათვის მოყვანილია შემდეგ ცხრილში:

ზოგიერთი მასალებისათვის ხვედრითი თბური წინააღმდეგობების და ხვედრითი
თბოგამტარობის მნიშვნელობის
ცხრილი

მასალების დასახელება	$\rho, ^{\circ}C/cm$ -ში	$\lambda, W/^{\circ}Ccm$ -ში	მასალების დასახელება	$\rho, ^{\circ}C/cm$ -ში	$\lambda, W/^{\circ}Ccm$ -ში
1. წითელი სპილენძი .	0,27	3,75	10. ბამბეულის და ტილოს გალაქული ქსოვილები .	4 00	0,0025
2. ფურცლოვანი ფოლადი .	—	იხ. ცხრ 7 (1,6)	11. თხელი საჭაერო ფენები 20 ÷ 80/ $^{\circ}C$ -დროს . . .	4 000	0,00025
3. ქარსი	280	0,003 ϵ	12. ღრმულის და კოქას ლა- ქით გაუღენთილი იზო- ლაცია საჭაერო ფენის აღრიცხვით	1000	0,001
4. დაწნეხილი მიკანიტის მას- რა	750	0,0013	13. სატრანსფორმატორო ზეთი	670	0,0015
5. ლაქსოვილი	500	0,002	14. წყალი	170	0,0058
6. პრესშანი	600	0,0017			
7. ქალაღი	850	0,0012			
8. გაზეფილი ქალაღი	720	0,0014			
9. გალაქული ქალაღი	600	0,0017			

მაგალითისათვის განვიხილოთ თბოგადაცემა მანქანის ღრმულის იზოლაციაში
(ნახ. 56, ბ) მივიღოთ, რომ ღრმულის იზოლაცია შედგება მიკანიტის მასრი-
საგან სისქით $\delta_1 = 0,5 cm$. საჭიროა მხედველობაში მივიღოთ, რომ სპილენძს,
მასრას და კბილს შორის აუცილებლად არის საჭაერო ფენები. ფენების რიცხ-
ვი მივიღოთ ორის ტოლი, თვითეული სისქით $\delta_2 = 5 \cdot 10^{-3} cm$. მივიღოთ
ღრმულში სიგრძის 1 cm -ზე (მანქანის ღერძის გასწვრივ) დანაკარგები 1 W -ს ტოლი
(5,2) და (5,3) თანახმად, ავიღებთ რა ზომებს ნახ. 56, ბ-დან მივიღოთ.

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{20} (750 \cdot 0,5 + 4000 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}) = 18,7 + 2 = 20,7.$$

დავუშვებთ რა $Q = 1W$, (5,1)-ს თანახმად მივიღებთ
 $\theta_1 - \theta_2 = 1 \cdot 20,7 = 20,7^{\circ}C$.

თუ თბოგადაცემა ხდება გარემოში თანაბრად განაწილებული სითბოს
წყაროებით, მაგალითად, კოქაში, რომელშიც გადის დენი, მაშინ ტემპერატურ-

რის განაწილება სითბოს ზოდრაობის მიმართულებით ატარებს პარაბოლურ ხასიათს. მაგილითისათვის განვიხილოთ მრგვალი ხევეებისაგან შემდგარი კოქა (ნახ. 57). მივიღოთ, რომ ყველაზე მეტად გახურებული ზონა სიმეტრიის გამო გადის კოქას კვეთის შუაში. კოქა წარმოადგენს არაერთგვაროვან გარემოს, რომელშიაც მაღალი თბოგამტარობის მქონე სპილენძი მონაცვლეობს სუსტად თბოგამტარ იზოლაციასთან, ამიტომ გაანგარიშებაში უნდა შევიტანოთ საშუალო მიყვანილი ხვედრითი თბოგამტარობა

$$\lambda'_{\text{ფ}} = \frac{1}{\rho'_{\text{ფ}}}$$

გამტარობა რამდენჯერმე მეტია იზოლაციის ხვედრით თბოგამტარობაზე და შეიძლება საიმედოდ განსაზღვრულ იქნას მხოლოდ ცდის საშუალებით. ლაქით გაფლენითილ კოქებისათვის, შეიძლება მიახლოებით ჩაეთვალოს:

$$\frac{\lambda'_{\text{ფ}}}{\lambda_{\text{ფ}}} = \frac{\rho'_{\text{ფ}}}{\rho_{\text{ფ}}} \approx 0,7 \left(\frac{d' - d}{d} \right)^{0,55} \quad (5,4)$$

სადაც d და d' შესაბამისად შიშველი და იზოლირებული გამტარების დიამეტრების ტოლია. თუ კოქას 1 cm^3 -ში დანაკარგებს აღვნიშნავთ qW ტოლად, მაშინ ნახ. 57 და (5,1)-ს თანახმად შეიძლება დაიწეროს:

$$d\dot{m} = qx\rho'_{\text{ფ}}dx$$

და

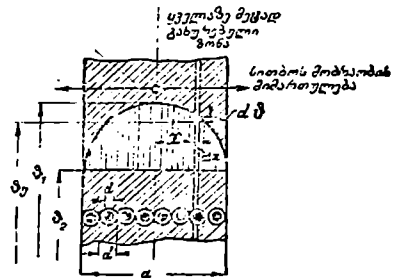
$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = \int_0^a d\dot{m} = q\rho'_{\text{ფ}} \int_0^a x dx = \frac{1}{8} q\rho'_{\text{ფ}} a^3 \quad (5,5)$$

(5,5)-დან გამომდინარეობს, რომ, როდესაც $q = \text{const}$, კოქას ყველაზე მეტად გახურებულ ნაწილსა და მის ზედაპირს შორის, ტემპერატურათა სხვაობა იზრდება კოქას a სისქის კვადრატის პროპორციულად და, რომ ტემპერატურა კოქას შიგნით განაწილდება კვადრატული პარაბოლის კანონის მიხედვით: $\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = \frac{1}{2} q\rho'_{\text{ფ}} a^2$.

ბ) თბოგადაცემა სხივფენით. ელექტრული მანქანების გარეგანი გახურებული ზედაპირებიდან თბოგადაცემა გარემოში (ჰაერი) წარმოებს სხივფენის და კონვექციის გზით.

თბოგადაცემა სხივფენის გზით განისაზღვრება სტეფან-ბოლცმანის (Stefan-Boltzman) და ლამბერტის (Lambert) კანონებით.

ელექტრულ მანქანებთან დაკავშირებული პრაქტიკული გაანგარიშების დროს, სხივფენით თავისუფალ ზედაპირის თბოგადაცემის გაანგარიშებისათვის უფრო მოსახერხებელია ვისარგებლოთ შემდეგი ემპირიული დამოკიდებულებით (როდესაც $\dot{m} - \dot{m}_0 \geq 5^\circ\text{C}$):



ნახ. 57. სითბოს გადაცემა კოქას შიგნით. სიცხადითვის კრილიში ნაჩვენებია გამტარების მხოლოდ ერთი რიგი.

$$k_{\lambda} \approx \left(4,4 + \frac{\vartheta_0}{16} + \frac{\vartheta - \vartheta_0}{28,5} \right) \eta W^{\circ} C m^2, \quad (5,6)$$

სადაც ϑ_0 — გარემომცველი ჰაერის ტემპერატურაა $^{\circ}C$ -ში, ϑ — სხივმფენი ზედაპირის ტემპერატურა $^{\circ}C$ -ში, η — მოცემული ზედაპირის აბსოლუტურად წაფისაგან განსხვავების აღმრიცხველი კოეფიციენტი. რკინის და თუჯის მქრქალი ზედაპირებისათვის $\eta \approx 0,95$, კოლექტორის გაკრიალებული ზედაპირებისათვის $\eta \approx 0,2$. კოეფიციენტი k_{λ} სხეულის $1 m^2$ ზედაპირიდან თავისუფალი სხივების გზით $1 sec$ -ში გადაცემული სითბოს რაოდენობის ტოლია, როდესაც ტემპერატურათა სხვაობა $\vartheta - \vartheta_0 = 1^{\circ}C$. როდესაც $\vartheta_0 \approx 25^{\circ}C$ და $\vartheta - \vartheta_0 \approx 25 \div 70^{\circ}C$ (5,6)-ს (5,7) მაგივრად შეიძლება ვისარგებლოთ უფრო მარტივი ფორმულით:

$$k_{\lambda} \approx 3 \eta \sqrt{\vartheta - \vartheta_0} W^{\circ} C m^2. \quad (5,7)$$

ელექტრული მანქანების ზედაპირების გახურების ჩვეულებრივი ტემპერატურების დროს $k_{\lambda} \approx 6 \div 8 W^{\circ} C m^2$, რაც $\vartheta - \vartheta_0 = 50^{\circ}C$ დროს შეესაბამება



ნახ. 58. თავისუფალი სხივების ზედაპირის განსაზღვრა.



ნახ. 59.

თბოგაცემას $300 \div 400 W$ $1 m^2$ -დან. რთული ფორმის ზედაპირების დროს თავისუფალ სხივების ზედაპირიდან, ლამბერტის კანონის თანახმად იღებენ მომვლენებს ზედაპირს. მაგალითად, ტალღური ზედაპირის შემთხვევაში (ნახ. 58) სხივების ზედაპირი განისაზღვრება პუნქტირული მომვლენები მრუდის $1/x$ სიგრძით.

გ) თბოგადაცემა კონვექციის გზით. მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტალური გამოკვლევების საფუძველზე ელექტრული მანქანების გახურებული ზედაპირების, გამაცივებელი გარემოს ბუნებრივი კონვექციით განპირობებული, თბოგაცემა, შეიძლება განსაზღვრულ იქნას შემდეგ ემპირიულ ფორმულიდან:

$\vartheta^{\circ}C$ -მდე გახურებული ვერტიკალური ზედაპირი, $\vartheta_0^{\circ}C$ ტემპერატურის მქონე ჰაერში:

$$k_{\kappa} \approx 2,5 \sqrt{\vartheta - \vartheta_0} W^{\circ} C m^2; \quad (5,8)$$

ჰორიზონტალური გახურებული ზედაპირი ჰაერში

$$k_{\kappa} \approx 3 \sqrt{\vartheta - \vartheta_0} W^{\circ} C m^2; \quad (5,9)$$

ამ ფორმულების შედარება (5,7)-თან გვაჩვენებს, რომ ელექტრულ მანქანებში $k_{\lambda} \approx k_{\kappa}^2$. ჰაერის ბუნებრივი კონვექციის გზით თბოგადაცემის განსაზღვრისას გაცივების ზედაპირად უნდა ავიღოთ გასაცივებელი სხეულის მთე-

1. ტრანსფორმატორების ხთვის ავზებში გამოყენებული, ვერტიკალურად განლაგებულ მილებს დიამეტრით $4 \div 5$ cm, K_{Σ} აქვთ დაახლოებით 30% -ით მეტი.

ლი ზედაპირი, ქვემო ჰორიზონტალური ზედაპირების გამოკლებით, და აგრეთვე ვიწრო ხერხების გვერდითი ზედაპირებისა, რომლებიც აძნელებენ გახურებულ ჰაერის მოძრაობას. ვაცივების ტალღური ზედაპირების დროს, რომლებიც პრაქტიკაში ხშირად გამოიყენებიან, უნდა აღვრიცხოთ ტალღის სრული ზედაპირი, გადავამრავლებთ რა მას შესწორების კოეფიციენტზე $\xi = 1 - \frac{\alpha^2}{200}$, სადაც $\alpha = \frac{b}{a} < 8$ (ნახ. 59).

თბოგაცემა კონვექციით სატრანსფორმატორო მინერალურ ზეთში დამოკიდებულია მის სიბლანტეზე, რომელიც ძლიერ იცვლება ტემპერატურისაგან დამოკიდებულებით. თავისუფალ ზედაპირისათვის ზეთში შეიძლება საშუალოდ მივიღოთ:

$$k_{\kappa} \approx 5(\vartheta - \vartheta_0) \text{ W/}^\circ\text{C m}^2; \quad (5,10)$$

კოქებისათვის ზეთში ჰორიზონტალურად განლაგებული ღარებით

$$k_{\kappa} \approx 3,5(\vartheta - \vartheta_0) \text{ W/}^\circ\text{C m}^2, \quad (5,11)$$

სადაც ϑ — გახურებული ზედაპირის ტემპერატურაა $^{\circ}\text{C}$ -ში, ϑ_0 — ზეთის ტემპერატურა $^{\circ}\text{C}$ -ში (რამდენიმე სანტიმეტრის მანძილზე კოქას ზედაპირიდან).

(5,8), (5,9) და (5,10), (5,11) ფორმულების შედარებიდან გამომდინარეობს, რომ თბოგადაცემა კონვექციით, ზეთში, როდესაც $\vartheta - \vartheta_0 \approx 20 \div 30^{\circ}\text{C}$ 15–20 ჯერ უფრო ინტენსიურად ხდება, ვიდრე ჰაერში.

გახურებული ზედაპირის ჰაერით ხელოვნურად შემობერვის დროს თბოგაცემა კონვექციით შეიძლება ძლიერ გაიზარდოს.

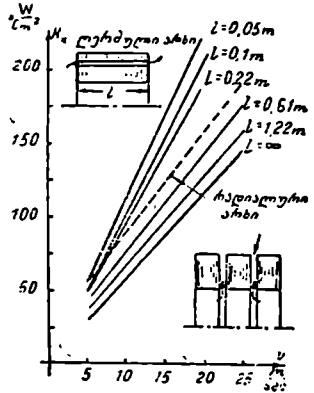
ვ. იურგესის (W. Iürges) ცდების თანახმად ვერტიკალურად მოთავსებული ზედაპირის, ჰაერით $v \text{ m/sec}$ -ში სიჩქარით თანაბრად შემობერვის დრო:

$$k_{\kappa} \approx 7,14 v^{0,78} \text{ W/}^\circ\text{C m}^2 (v \geq 5 \text{ m/sec}); \quad (5,12)$$

$$k_{\kappa} \approx 5,2 + 3,95 v \text{ W/}^\circ\text{C m}^2 (v \leq 5 \text{ m/sec}). \quad (5,13)$$

(5,12)-დან გამომდინარეობს, რომ, მაგალითად, როდესაც $v = 10 \text{ m/sec}$, გახურებული სხეულის ზედაპირიდან თბოგაცემა იზრდება დაახლოებით 8-ჯერ ბუნებრივ კონვექციასთან შედარებით.

ცდები გვიჩვენებს, რომ იმავე მიზეზით მანქანის ბრუნვის სიჩქარის ცვლის დროს მისი ცალკეული ნაწილების დამყარებული გადახურება გარემომცველი ჰაერის მიმართ იცვლება დაახლოებით $1 + \beta \sqrt{v}$ უკუპროპორციულად, სადაც v — მანქანაში ჰაერის მოძრაობის სიჩქარეა m/sec -ში გასაცივებელი ნაწილების ახლოს, $\beta \leq 1,3$ — კოეფიციენტი, დამოკიდებული მისი შემობერვის ინტენსიობაზე.



ნახ. 60. გ. ლუკის ექსპერიმენტალური მონაცემები ელექტროლიზის მანქანების სავენტილაციო არხებში თბოგადაცემის შესახებ. v — ჰაერის საშუალო სიჩქარე არხში, k_{κ} — თბოგადაცემის კოეფიციენტი მიყვანილი არხის კედლებსა და ჰაერს შორის ტემპერატურათა საშუალო სხვაობასთან.

მანქანის გამაცივებელ ღარებში ჰაერის, ზეთის ან წყლის მოძრაობის დროს ღარის კედლების საშუალებით გადაცემულ ΔP დანაკარგებსა და გამაცივებელ გარემოს V ხარჯს შორის არსებობს შემდეგი დამოკიდებულება.

$$\Delta P = Vc\Delta\theta, \quad (5,14)$$

სადაც c — გამაცივებელი გარემოს თბოტევადობაა, $\Delta\theta$ ღარში შემავალ და გამავალ გარემოს ტემპერატურათა სხვაობა $^{\circ}\text{C}$ -ში.

ჩავსვათ რა (5,14)-ში c -ს რიცხობრივ მნიშვნელობებს, მივიღებთ: ჰაერისათვის

$$\Delta P = 1,1 V \Delta\theta k W^1; \quad (5,15)$$

ზეთისათვის

$$\Delta P = 1,71 V \Delta\theta k W; \quad (5,16)$$

წყლისათვის

$$\Delta P = 4,18 V \Delta\theta k W, \quad (5,17)$$

სადაც V გამოსახულია m^3/sec -ში ჰაერისათვის და $1/\text{sec}$ -ში ზეთისა და წყლისათვის.

(5,15), (5,16), და (5,17) შედარებიდან გამომდინარეობს, რომ ერთი და იგივე სითბოს გადასაცემად ჰაერის, ზეთისა და წყლის შემთხვევაში, საჭირო გამაცივებელი გარემოს მოცულობები ისე შეეფარდებიან ერთმანეთს, როგორც $3810 : 2,45 : 1$.

ნახ. 60-ზე მოყვანილია გ. ე. ლუკის (G. E. Luke) ცდების მონაცემები, რომლებიც შეეხებიან ელექტრული მანქანების სავენტილაციო ღარებში თბოგაცემას ჰაერის ხელოვნური კონვექციის გზით.

6. ელემტარულ მანქანებში გამოყენებული ძირითადი მასალები

ელექტრული მანქანის ხარისხი, მისი ეკონომიურობა, უავარიო მუშაობის უნარი დამოკიდებულია არა მარტო სწორ ელექტრომაგნიტურ გაანგარიშებზე, არამედ აგრეთვე მის კონსტრუქციასა და განსაკუთრებით მასალების თვისებებზე, რომლებიდანაც დამზადებულია მანქანა.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს იზოლაციასა და საიზოლაციო მასალების საკითხებს ელექტრული მანქანის დენგამტარი სისტემისათვის როგორც ნორმალური მუშაობის დროს, ასევე ავარიული პროცესების დროს, რომლებიც დაკავშირებულია ძაბვის ხანმოკლე აწევისთან (გადაძაბვები). არანაკლები მნიშვნელობა აქვს მანქანის უავარიო მუშაობისათვის მასალების სწორ შერჩევას, რაც უზრუნველყოფს მანქანის ცალკეული ნაწილების საკმაო მექანიკურ სიმტკიცეს. სწრაფმავალი მანქანების როტორებში, განსაკუთრებით ტურბოგენერატორებში, მათი ბრუნვის დროს აღიძვრება მნიშვნელოვანი მექანიკური დაძაბულობა ცენტრიდანული ძალებისაგან, ხოლო ზოგიერთ შემთხვევებში აგრეთვე ვიბრაციებიც, რომლებიც აუცილებელია მხედველობაში იქნეს მიღებული მანქანების გაანგარიშების და კონსტრუირების დროს. კონსტრუქციების და მასალების მექანიკური სიმტკიცის საკითხები აღიძვრება აგრეთვე ავარიული პროცესების დროს — მოკლედ ჩართებისა, როდესაც გრავნილებში დენის მკვეთრი გაზრდისას, მათ ცალკეულ ნაწილებს შორის, და აგრეთვე

¹ იხ. აგრეთვე ფორმულები (41,6) და (41,7).

მათ ნაწილებსა და მანქანის მაგნიტურ სისტემას შორის აღიძვრება დიდი ელექტრომაგნიტური ძალები, რომელთაც შეუძლია ადვილად დაანგრიონ გრაგნილი მისი არასაკმაო მექანიკური სიმტკიცის შემთხვევაში.

მასალების საკითხი, რომლებიც გამოიყენება ელექტრომანქანათმშენებლობაში, წარმოადგენს მასალათმცოდნეობის დამოუკიდებელ დიდ ნაწილს. წინამდებარე ნაწილში ჩვენ დავკმაყოფილებით მხოლოდ იმ მასალების მოკლე დახასიათებით, რომლებიც უშუალო ვაგლენას ახდენენ მანქანის ელექტრომაგნიტურ თვისებებზე.

ა) გამტარებისათვის გამოიყენებული მასალები. ელექტრულ მანქანებში გამტარებისათვის გამოიყენება სპილენძი, ალუმინი და მათი შენადნობები. ზოგჯერ ფერადი ლითონების ეკონომიის ან მექანიკური სიმტკიცის გაზრდის მიზნით ზოგიერთ დამხმარე დენგამტარ ნაწილებს ამზადებენ რკინის ან ფოლადისგან. სპილენძის და ალუმინის შედარებითი მონაკვემები მოყვანილია ცხრილში 1.

ცხრილი 1

გამტარებისათვის გამოიყენებული მასალების ძირითადი თვისებები

მასალა	ხარისხი	ხვედრითი წონა	ხვედრითი წინააღმდეგობა 20°C -ს დროს $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ -ში	წინააღმდეგობის ტემპერატურული კოეფიციენტი	ხახური გაფართოების კოეფიციენტი	ხვედრითი თბეობა $W/\text{sec}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ -ში	ხვედრითი თბეობა გამტარობა $W/\text{sec cm}^2$ -ში
სპილენძი	ელექტროაღმოსაღწევი	8,9	$17,24 \cdot 10^{-3}$ $17,54 \cdot 10^{-3}$	$\frac{1}{234,5 + t}$ როდესაც $t^{\circ}\text{C}$	$1,68 \cdot 10^{-6}$	390	3,75
ალუმინი	რაფინირებული	2,6—2,7	$29,2 \cdot 10^{-3}$	$\frac{1}{250}$	$2,31 \cdot 10^{-6}$	816	2,03

შენიშვნა: ალუმინი გამოიყენება ასინქრონული ძრავების მოკლედ შერთული როტორებისათვის და იშვიათად სხვა გრაგნილებისათვის.

ბ) მაგნიტური მასალები. ელექტრული მანქანის მაგნიტურ სისტემის ცალკეულ ნაწილების დასამზადებლად გამოიყენება: 1) ფურცლოვანი ელექტროტექნიკური ფოლადი, 2) ფოლადის სხმული და 3) თუჯი OCT 6391 თანახმად გამოიყენება ცხრილ 2-ში მოყვანილი ფურცლოვანი ფოლადის მარკები.

ფოლადის მარკის ასოებით აღნიშვნა შედგენილია შემდეგი პრინციპის მიხედვით ა) ასო E გვიჩვენებს, რომ ფოლადი—ელექტროტექნიკურია, ბ) ასო C—რომ ფოლადში არსებობს კაეზადი, გ) ციფრები 1, 2, 3, 4, გვიჩვენებს ფოლადში კაეზადის საშუალო პროცენტულ შემადგენლობას; დ) ასო A—აღნიშნავს ფოლადის გაუმჯობესებულ მაგნიტურ და ელექტრულ თვისებებს, ე) ასოები AA—ფოლადის განსაკუთრებით მაღალ მაგნიტურ და ელექტრულ თვისებებს.

ფოლადს EC1A აქვს ფურცლების სისქე 0.5 და 1 mm. ფოლადს EC3A, EC4, EC4A—0,35 და 0,5 mm, დანარჩენ მარკებს—0,5 mm.

ცხრილი 2

ფოლადის მარკა	რეკომენდებული გამოყენება
EC1	ძრავებისა და გენერატორებისათვის, რომლებიც ალიჯნებიან მუდმივი დენით ან ცვლადი დენის სუსტი არეების დროს
EC1A	წორმალურ (სერიულ) ძრავებისა და გენერატორებისათვის
EC1AA	სპეციალური დანიშნულების ძრავებისა და გენერატორებისათვის
EC2A	მაგნეტოსათვის
EC3A	1,000 KW-ზე ნაკლები სიმძლავრის ტურბოგენერატორებისა და სპეციალური დანიშნულების მანქანებისათვის
EC4	ხარის, სუსტი დენის, საქვაბე. შემდუღებელ ტრანსფორმატორებისა და სინქრონულ მანქანებისათვის სიმძლავრით 5 000 KW-მდე
EC4A	0,35 mm სისქის ფოლადი, ძაბვის და დენის გამზომ ტრანსფორმატორებისათვის, ძალოვან ტრანსფორმატორებისათვის 5-დან 180 KVA-მდე, 0,5 mm სისქის ფოლადი 1 000—5600 KVA სიმძლავრის ძალოვანი ტრანსფორმატორებისათვის, 1 000 KW-ზე მეტი სიმძლავრის ტურბო და ჰიდროგენერატორებისათვის
EC4AA	0,5 mm სისქის ფოლადი 320 და 560 KVA და 5 600 KVA-ზე მეტი სიმძლავრის ძალოვანი ტრანსფორმატორებისათვის, და აგრეთვე დენის გამზომ ტრანსფორმატორებისათვის.

ფოლადის ხარისხის მიხედვით ფურცლების სიგრძე შეიძლება იყოს 1500 და 2 000 mm, სიგანე — 750 და 1 000 mm.

ფურცლოვანი ელექტროტექნიკური ფოლადის მაგნიტური ინდუქცია დამაგნიტებელ ამპერხვევების განსაზღვრულ მნიშვნელობისათვის a_w 1 cm-ზე არ უნდა იყოს ცხრ. 3-ში ნაჩვენებ (OCT 6391)-ზე ნაკლები.

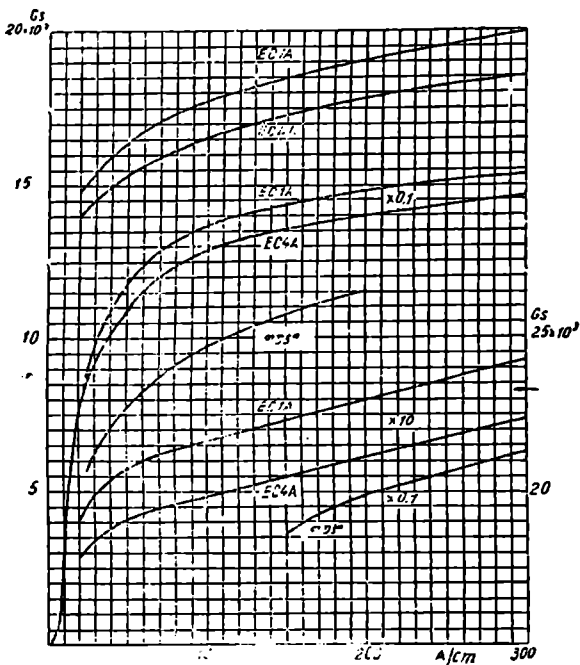
ცხრილი 3

ფოლადის მარკა	ფურცლის სისქე mm-ში	მაგნიტური ინდუქცია Gs-ში 1 cm-ზე ამპერხვევების მნიშვნელობებისათვის			
		25	50	100	300
		არ არის სტანდარტიზირებული			
EC1A	1,0				
EC1A	0,5	15 100	16 400	17 700	19 900
EC1	0,5	15 000	16 300	17 500	19 700
EC1AA	0,5	14 700	15 800	17 000	19 200
EC2A	0,5	14 600	15 700	16 800	19 000
EC3A	0,5; 0,35	14 500	15 600	16 700	18 900
EC4AA,					
EC4A	0,5	14 300	15 400	16 500	18 500
EC4A	0,35	14 300	15 400	16 500	18 500
EC4	0,5; 0,35	14 400	15 500	16 600	18 700

ამ ცხრილით პრაქტიკული სარგებლობის დროს შედევლობაში უნდა მივიღოთ, რომ მაგნიტური ინდუქციის დამოკიდებულება მაგნიტური არეს დამაზღობისაგან განიცდის გარკვეულ რყევას ერთი და იგივე მარკის ფოლა-

დის ზღვრებშია ც კი, ამიტომ ცხრილის მონაცემები შეიძლება განვიხილოთ მხოლოდ როგორც მინიმალური მნიშვნელობანი.

ნახ. 61-ზე მოყვანილია დამაგნიტების მრუდები $B=f(aw)$ ფოლადის EC1A და EC4A მარკებისათვის, რომლებიც თავის მაგნიტური თვისებების მიხედვით ზღვრული არიან. ინდუქციის მცირე მნიშვნელობის არეში, მრუდები მიღებულია ექსტრაპოლაციის გზით ცდის მონაცემების მხედველობაში მი-



ნახ. 61. სხვადასხვა მარკის ფოლადისა და თუჯის მაგნიტური მახასიათებლები (დამაგნიტების მრუდები). არეს დამატულობათა აბსცისათა ლერძზე ნაჩვენები მნიშვნელობები უნდა იქნეს გამრავლებული 0,1-ზე და 10-ზე იმ მრუდებისათვის, რომელთა გვერდზე ნაჩვენებია ეს გამრავლები.

ლებით. სხვა მარკის ფოლადების დამაგნიტების მრუდები ადვილად შეიძლება იქნას მიღებული ინტერპოლაციის გზით ცხრ. 3 მონაცემების მიხედვით.

ინდუქციის დიდი მნიშვნელობების დროს ფოლადის მაგნიტური თვისებების განსაზღვრისათვის შეიძლება სარგებლობა თანაფარდობით

$$B = I\alpha + 0,4\pi H, \quad (6,1)$$

სადაც ინდუქცია B და დამაგნიტების მაქსიმალური ინტენსივობა $I\alpha$ გამოსახულია ჰაუსებში, ხოლო H —ამპერხვევებში 1 cm-ზე.

1. მნიშვნელობანი და ინდუქციის მინიმალური მნიშვნელობანი B_{min} რომელთა ქვევით არ შეიძლება ვისარგებლოთ (6,1) ფორმულით, მოყვანილია ცხრილში 4.

ჩვეულებრივად გვიხდება B -ს წინასწარ მოცემულ მნიშვნელობითი არეს H დაძაბულობის განსაზღვრა. (6,1)-დან ვაკვს

$$H = \frac{B - I_{\infty}}{0,4 \pi} \quad (6,2)$$

ფურცლოვან ფოლადში ენერჯის დანაკარგები ჰისტერეზისზე და გრიგალისებურ დენებზე 50 H , სიხშირის დროს და ინდუქციის დროში სინუსოიდურად ცვალებადობისას OCT 6391 თანახმად არ უნდა აღემატებოდეს ცხრ. 5-ში მოყვანილ მნიშვნელობებს.

ცხრილი 4

ფოლადის მარკები	EC1A	EC1	EC1AA	EC2A	EC3A	EC4	EC4A EC4AA
J_{∞}	20 400	20 150	19 500	19 250	19 100	18 850	18 600
B_{min}	21 500	21 200	20 500	20 250	20 100	19 800	19 500

ცხრილი 5

ფოლადის მარკა	ფურცლის სისქე 0,5 mm დანაკარგები W/kG-ში			ფურცლის სისქე 0,35 mm დანაკარგები W/kG-ში		
	$B=10\ 000$	$B=15\ 000$	n	$B=10\ 000$	$B=15\ 000$	n
EC1	3,6	8,6	2,15	—	—	—
EC1A	3,3	7,9	2,16	—	—	—
EC1AA	2,85	7,0	2,22	—	—	—
EC2A	2,6	6,4	2,23	—	—	—
EC3A	2,3	5,6	2,20	2,0	4,2	1,84
EC4	1,8	3,9	1,92	1,45	3,4	2,11
EC4A	1,8	3,8	1,78	1,3	3,3	2,30
EC4AA	1,6	3,5	1,93	—	—	—

ხვედრითი დანაკარგების შესაბამისი მნიშვნელობების განსაზღვრისათვის სხვა ინდუქციების შემთხვევაში, რომლებიც მოთავსებული არიან ზღვრებში $B=5\ 000 \div 16\ 000$ Gs, და სხვა სიხშირეების დროს, $f=100$ Hz-მდე, შეიძლება სარგებლობა თანაფარდობებით

$$p = p_{10} \left(\frac{B}{10} \right)^n \left(\frac{f}{50} \right)^{1,25} \text{ W/kG}; \quad (6,3)$$

$$n = 5,69 \lg \frac{p_{15}}{p_{10}}, \quad (6,4)$$

სადაც p_{10} და $p_{1\alpha}$ — ხვედრითი დანაკარგებია შესაბამისად 10 000 და 15 000 Gs და 50 Hz სიხშირის დროს.

ხარისხის მაჩვენებლის მნიშვნელობანი მოყვანილია ცხრ. 5-ში.

უკანასკნელ ხანებში საზღვარგარეთ მიღწეულია დიდი წარმატებანი ფურცლოვანი ფოლადის წარმოებაში ხვედრითი დანაკარგების შემცირების-თვის. 0,35 mm სისქის ფურცლებისათვის დანაკარგები შემცირებულია $p_{10} = 0,8 \pm 0,9$ W/kg.

გრიგალურ დენებზე დანაკარგების შესამცირებლად ფოლადის ფურცლები ერთმანეთისაგან განმხოლოვებიან ქალაღით, მინანქრის ლაქით ან თხევადი შინით. პაკეტის ფოლადით შევსების კოფეციენტის მნიშვნელობანი იზოლაციის გვარობის და ფოლადის ფურცლების სისქისაგან დამოკიდებულიებით მოყვანილია ცხრ. 6-ში. ეს მნიშვნელობანი წარმოადგენენ საშუალოს, ვინაიდან იცვლებიან ფურცლების დაწინების და მათი სისქის არაერთ-გვაროვნობისაგან დამოკიდებულად.

ფურცლოვანი ფოლადის ზოგიერთი ფიზიკური თვისებების დამოკიდებულება კაეზადის პროცენტულ შემადგენლობისაგან მოცემულია ცხრ. 7-ში.

ელექტრული მანქანების მაგნიტური სისტემის ცალკეული ნაწილების დასამზადებლად ელექტროტექნიკური ფურცლოვანი ფოლადის გარდა ხმარობენ სხმულ დინამიკურ ფოლადს, ნაგლინ და ნაქედ ფოლადს და თუჯს. ამ მასალების გამოყენება შესაძლოა მაგნიტური სისტემის მხოლოდ იმ ნაწილებისათვის, რომელთა მაგნიტური არე მუდმივია.

ფოლადის მაგნიტური მახასიათებელი მისი ფიზიკურ-ქიმიური თავისებურებების მიხედვით ირყევა საკმაოდ ფართო ზღვრებში და უახლოვდება EC1A ფურცლოვანი ფოლადის მახასიათებელს (ნახ. 61).

ცხრილი 6

იზოლაციების გვარობა	ქალაღი	მინანქრის- ბური ლაქი	თხევადი მინა	შენიშვნა
იზოლაციის სისქე mm-ში	0,03	0,02	0,015	მაკეტის ფოლადით შევსების კოფეციენტი ტოლია სუფთა ფოლადის (უიზოლაციოდ) კვეთის შეფარდებისა მთელი პაკეტის კვეთთან
პაკეტის ფოლადით შევსების კოფეციენტი ფურცლის ზომი სისქის დროს	$\eta = 0,35$	0,85	0,90	
	$\eta = 0,5$	0,88	0,92	

თუჯის მაგნიტური თვისებები რომელიც იხმარება ჩვენს ელექტრომანქანათმშენებელ ქარხნებში, ნაჩვენებია ნახ. 61-ზე.

გ) განმამზოლოვებელი მახალები. ელექტრული მანქანების დენგამტარი ნაწილების გამხოლოვებისათვის იხმარება მყარი, თხევადი და აიროვანი დი-ელექტრიკები. OCT 20020-ის თანახმად ეს გამამხოლოვებელი მასალები თ-

ვისი თბომდგრადობის და ფიზიკურ-ქიმიური თვისებების მიხედვით იყოფა შემდეგ კლასებად:

იზოლაციის კლასი O—ბამბა, აბრეშუმი, ქალაღი და სხვა მსგავსი ორგანული მასალები, გაუტენთავი, რომლებიც არ არიან ოთავსებუ-

ცხ40ლი 7

Si-ს შემცველობა	1%	2%	3%	4%
ხვედრითი წონა	7,8	7,75	7,65	7,6
ხვედრითი თბოგამტარობა W/C°cm-ში	0,46	0,32	0,25	0,2
ხვედრითი წინააღმდეგობა $\lambda \cdot \text{mm}^2/\text{m} \cdot \text{წმ}$ -ში	0,22	0,34	0,46	0,58
წინააღობის ტემპერატურული კოეფიციენტი	0,0025	0,0015	0,001	0,0008
ხვედრითი თბოტევადობა Wsec/KG°C	460	—	—	480

ლი ზეთში. ამ კლასებისათვის ზღვრულ. ხანგრძლივად დასაშვები ტემპერატურაა 90°C.

იზოლაციის კლასი A—ბამბა, აბრეშუმი, ქალაღი და სხვა მსგავსი ორგანული მასალები გაუტენთილი ან მოთავსებული ზეთში, აგრეთვე შემადგენლობა, რომელსაც ეწოდება მინანქარი და იხმარება მინანქარიანი მავაულის დამზადების დროს.

ბამბეულის, ქალაღის და აბრეშუმის იზოლაცია ითვლება გაუტენთილად, თუ გამტენთი ნივთიერება გამოდენის პერს ცალკეულ ბოჭკოებს შორის, ამასთან მაშინაც კი, როდესაც ეს ნივთიერება სავსებით არ ავსებს შუალედებს ცალკეულ განმხოლოებულ გამტარებს შორის.

ზღვრული, ხანგრძლივად დასაშვები ტემპერატურა ამ კლასის იზოლაციისათვის 105°C.

იზოლაციის კლასი B—პრეპარატები ქარსისა და აზბესტისაგან, რომლებიც შეიცავენ შემკვერელ ნივთიერებას.

თუ B კლასის საიზოლაციო მასალებთან ერთად გამაგრების მიზნით მკირე რაოდენობით გამოყენებულია A კლასის საიზოლაციო მასალები, მაშინ ასეთი საიზოლაციო მასალებს მიაკუთვნებენ B კლასის მასალებს იმ პირობით, რომ ასეთი იზოლაციის მქონე გრაგნილის არც ელექტრული და არც მექანიკური თვისებები არ უნდა გაუარესდეს, B კლასის მასალებისათვის დასაშვები ტემპერატურის მოქმედების შედეგად.

ზღვრული, ხანგრძლივად დასაშვები ტემპერატურა B კლასისათვის 130°C.

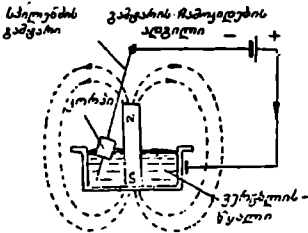
იზოლაციის კლასი C—ქარსი შემკვერელ ნივთიერების გარეშე, ფაიფური, მინა, კვარცი და სხვა მსგავსი მასალები. ზღვრული ტემპერატურა ამ კლასისათვის არ არის დადგენილი და განისაზღვრება მეზობელ ნაკლებად თბომდგრად განმამხოლოებელი მასალების გახურებით.

იზოლაციის კლასი BC—ქარსი და აზბესტი თბომდგრად ლაქებზე, ასფალტის ლაქებით და კომპაუნდებით გატენთის გარეშე. იზოლაციის მოცემული კლასი შეიძლება განხილულ იქნას, როგორც B კლასი გაძლი-

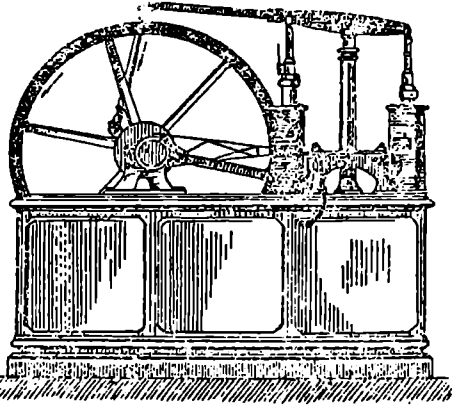
იზოლირებული მასალის საბელ-წოდება	მასალის დახასიათება	გამოყენება
1. პრესშანი	მალალი ხარისხის დაწნეხილი მუყაო ჰიგროსკოპიულია. სისქე 0,3-დან 3mm-მდე	იხნარება საიზოლაციო ნაფენებისათვის, შესადგმებისა და ღრმულის იზოლაციისათვის
2. ლეტეროიდი	დაწნეხილი მუყაოს სპეციალური ტიპი, გაყვებილი ბამბის ბოჭკოსაგან. მექანიკურად გამძლე და მაგარი	ღრმულის განხლოლება
3. ელფანტიდი	განსაკუთრებული მალალი ხარისხის მუყაო. ჩერის ბოჭკოს 100%-იანი კომპოზიცია	ზეთიანი ტრანსფორმატორების იზოლაციისათვის ფარების, საყვლეუბის რბილი ცილინდრების სახით
4. ფიბრა	სპეციალური დამუშავების დაწნეხილი ბოჭკოვანი მასალა. ძლიერ ჰიგროსკოპიულია. მექანიკურად კარგად მუშავდება	სანახელავე გამამზოლებელი მასალა (ნაფენები, ნილაკები, კანკიები და ა. შ.)
5. ბაკელიზირებული ქალაღი	ბაკელიტის ლაქით გაყვნილი 0,05—0,1mm, სისქის ქალაღი არაჰიგროსკოპიულია	გრაგნილის ღეროების გამამზოლებებისათვის. გამამზოლებელი მილაკების, ცილინდრების, დაფების დასამზადრელად
6. ბამბის ლენტო	10-დან 50 mm-მდე სიგანის ლენტი, სისქითი 0,1 ± 2,5 mm სანი ხარისხისა: თავიის, უჯრედული ქსოვილის და მიტკალის, ყველაზე უფრო მტკიცეა უჯრედული ქსოვილის ლენტი. იზოლირების შემდეგ გაიჟლინდება	შებლური ნაწილების, შემაგრებელი გამტარების გამამზოლებებისათვის, მექანიკური დაკავშირებისათვის
7. ლაქ-ქსოვილი	ლაქით გაყვნილი თხელი ტილო ან ბატისტი, სისქე 0,1-დან 0,3 mm-მდე	გრაგნილების შებლური ნაწილების. გათყვანების და ა. შ. გამამზოლებებისათვის
8. მიკანიტი	ლაქით შეწებებული დაფურცლული ქარსი, დაწნეხილი ფურცლების სახით	გამამზოლებელი შესადგმებისათვის
9. მიკაფოლიუმი	დაფურცლული ქარსი, რამდენიმე ფენად დაწნეხილი საკაბელო ან იაპონურ ქალაღზე. მალალი ელექტრული სიმტკიცის რბილი ელასტიკური მასალა. სისქე 0,2 ± 0,35 mm	მალალი ძაბვის მანქანების ღრმულების გამამზოლებებისათვის
10. მიკალენტი	დაფურცლული ქარსი, ლაქით დაწებებული იაპონური ქალაღის ლენტზე. ლეტის სიგანე 12,5 ± 45 mm აქვს მალალი გამამზოლებელი თვისებები	მალალი ძაბვის მანქანების გრაგნილების გამამზოლებებისათვის
11. ახბეტის ტილო და ლენტა	სპეციალური გამომუშავების ახბეტის ქსოვილი. თბომდგრადია, მაგრამ აქვს დაბალი გამამზოლებელი თვისებები. სისქე აქვს 0,25 mm და მეტი	ღრმულში ჩადებულ გრაგნილების ხელაპირების გამამზოლებებისათვის
12. საკაბელო ქალაღი	ქალაღი სულფატური ცელულოზიდან	ტრანსფორმატორების გრაგნილების, კოჭების და გამომყვანების გამამზოლებებისათვის

რებული თბომდგრადობით. ამ კლასის იზოლაცია იხმარება სინქრონული მანქანების აგზნების ერთრიგიან გრაგნილებსათვის. BC კლასისათვის ზღვრული, ხანგრძლივად დასაშვები ტემპერატურა ტოლია $C=140^{\circ}$.

ელექტრულ მანქანებში გამოყენებული ძირითადი მყარი განმამხოლოვებელი მასალების მოკლე დახასიათება, მოყვანილია ცხრილ მ-ში. მყარ იზოლაციასთან ერთად ფართოდ გამოიყენება ლაქები და კომპაუნდების სხვადა-



ნახ. 62.



ნახ. 63. ელექტრული ძრავი წინსვლით-უკუქცევითი მოძრაობით. A და B-ელექტრომაგნიტებია.

სხვა სპეციალური ხარისხები. თხევადი იზოლაცია ზეთის სახით, იხმარება მხოლოდ ტრანსფორმატორებში.

აიროვან იზოლაციად განსაკუთრებით ფართოდ გამოიყენება ჰაერი, ხოლო ზოგიერთ შემთხვევებში აგრეთვე წყალბადი, აზოტი და ნახშირმჟავა, როგორც ატმოსფერულ, ასევე მთელ რიგ კონსტრუქციებში გაზრდილი წნევით.

7. ელემენტური მანქანის განვითარების მოკლე ისტორია

დაახლოებით ასოცი წლის წინათ 1822 წ., მ. ფარადის (M. Faraday) მიერ პირველად იქნა აღმოჩენილი ელექტრული ენერჯის გამოყენების შესაძლებლობა მექანიკური მუშაობის მისაღებად. მ. ფარადის მიერ ცდის დროს გამოყენებული მოდელი სქემატურად ნაჩვენებია ნახ. 62-ზე.

გაატარა რა დენი სპილენძის გამტარში, რომელიც ერთი ბოლოთი თავისუფლად იყო ჩამოკიდებული, ხოლო მეორეთი ცურავდა ვერცხლისწყლიან თასში, მ. ფარადემ მიიღო გამტარის ბრუნვა ვერტიკალურად მოთავსებულ მაგნიტის ლერძის ირვლივ. ეს მოდელი შეგვიძლია განვიხილოთ როგორც თანამედროვე ელექტროძრავის პროტოტიპი. მაგრამ ელექტრული ძრავის შემდგომი განვითარება, ორთქლის მანქანების კონსტრუქციების გავლენის შედეგად, დასაწყისში წავიდა სხვა გზით. ელექტრული ენერჯის მექანიკურად გარ-

დაქმნისათვის გამოყენებულ იქნა წინსვლით—უკუქცევითი მოძრაობა. დღუ-
შების და ცილინდრების როლს ასრულებდნენ ელექტრომაგნიტები (ნახ. 63).
მხოლოდ 1834 წ. რუს აკადემიკოს ბ. ს. იაკობის მიერ შექმნილი იქნა ელექ-
ტროძრავი, რომელშიც ელექტრომაგნიტური გზით უშუალოდ მიიღებოდა
ბრუნვითი მოძრაობა. ბ. ს. იაკობის ძრავის საერთო ხელი ნაჩვენებია ნახ. 64-
ზე. ამ ძრავში ბრუნვის მომენტი იქმნებოდა უძრავ და მბრუნავ ელექტრომა-
გნიტების ურთიერთქმედების შედეგად, რომლებშიც დენი დროის შესაბამის
მომენტში გადაირთვებოდა განსაკუთრებული კომუტატორის საშუალებით. დე-
ნის წყაროს წარმოადგენდა გალვანური ბატარეა. უკვე 1839 წ. ბ. ს. იაკო-
ბიმ შეძლო ნაგზე დაყენებულ 1 ცხ. ძ. სიმძლავრის მქონე ასეთი ძრავით 14
მგზავრით ნაოსნობა მდინარე ნევაზე.

ვინაიდან იმ დროს ელექტროძრავის კვების წყაროს წარმოადგენდა
გალვანური ელემენტები, ამიტომ რასაკვირველია, ელექტროძრავებს ჯერ კი-
დეც არ შეეძლოთ კონკურენციის გაწევა ორთქლის მანქანისათვის. წარმოება-
ში ელექტროძრავის დანერგვა მოითხოვდა უფრო ძლიერი და ეკონომიური
დენის წყაროების, ელექტრული გენერატორების შექმნას.

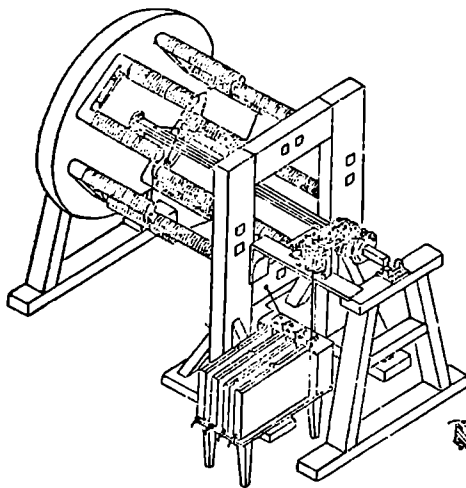
ძრავების და გენერატორების განვითარება დროის პირველ პერიოდში
მიმდინარეობდა დამოუკიდებელი გზებით. შექცევადობის პრინციპი ჯერ კი-
დეც არ იყო ცნობილი. იგი ფორმულირებული იყო მხოლოდ 1847 წ. ბ. ს.
იაკობის მიერ.

ისეთი ელექტრული გენერატორის შექმნის შესაძლებლობა, რომელიც
შეცვლიდა გალვანურ ელემენტს, შეიქმნა მხოლოდ ნ. ფარადეის მიერ 1831 წ.
ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის აღმოჩენის შემდეგ. უკვე ერთი წლის
შემდეგ, 1832 წ. ძმებმა პიკსებმა (Puxii) მ. ფარადეის აღმოჩენის საფუძველზე
შეძლეს ელექტრული დენის პირველი გენერატორის კონსტრუირება (ნახ. 65).
მისწრაფებამ, მიგველო გალვანური ელემენტების შემცვლელი გენერატორი,
ე. ი. ისეთი, რომელიც მოგვეცემდა მუდმივ დენს, მიგვიყვანა იქამდე, რომ იმ
დროის თითქმის ყველა მანქანებს ქონდა სპეციალური კომუტატორები დენის
გასამართავად.

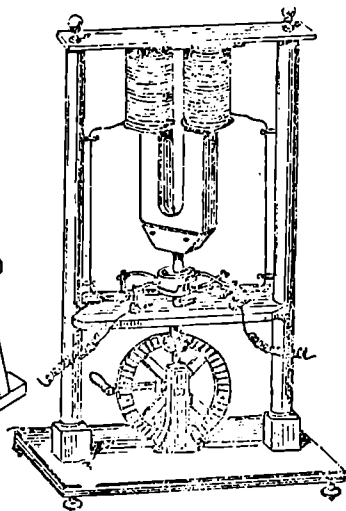
გენერატორების განვითარების შემდგომ ეტაპს წარმოადგენდა მუდმივი
ძაგნიტების შეცვლა ელექტრომაგნიტებით. ეს ეხება დაახლოებით 1845 წ.
ამგვარად ელექტრომაგნიტებმა გაცილებით უფრო ადრე ჰპოვეს გამოყენება
ძრავებში, ვიდრე გენერატორებში. ელექტრული მანქანის სწრაზად განვითარ-
ების მნიშვნელობაზე იმ პერიოდში, როდესაც უკვე დაისახა მისი ორთქლის
მანქანასთან კონკურენციის შესაძლებლობა, შეიძლება მსჯელობა კარლ მარქ-
სის გამოთქმების მიხედვით, რომელიც ეკუთვნის 1850 წ. რის შესახებ თავის
შემუარებში მოგვითხრობს ვ. ლიბნეხტი: „ჩვენ მალე შევებეთ ბუნებისმეტყვე-
ლების სფეროს. მარქსი ირონიულად ლაპარაკობდა ევროპაში ძლევაშოსილად
გამეფებულ რეაქციაზე, რომელსაც ჰგონიათ, რომ რეაქციამ რევოლუცია გას-
რისა, არა აქვს რა ეკვი, რომ ბუნებისმეტყველების მიღწევანი ანზადებს
ახალ რევოლუციას. მისი უდიდებულესობა ორთქლი, რომელმაც გასულ საუუუნე-
ში მსოფლიოში ყველაფერი თავდაყირა დააყენა, ახლა სტოვებს სტენას და
თავის ადგილს უთმობს შეუღარებლად უფრო ძლიერ რევოლუციონერს ელექ-

ტრულ ნაპერწკალს. ამასთან მარქსმა, მთლიანად ენთუზიზმით : შებყრო-
ბილმა, მომიყვა მე, რომ უკვე რამდენიმე დღეა რიდენტ—სტრიტზე გამოფენილ-
ია ელექტრული მანქანის მოდელი, რომელსაც მოძრაობაში მოყავს რკინიგზის
მატარებელი. ეხლა, ლაპარაკობდა იგი, პრობლემა გადაწყვეტილია, შედეგი
თვალუწვდენელია. ეკონომიურ რევოლუციას აუცილებლად უნდა მოჰყვეს პო-
ლიტიკური, ვინაიდან მეორე წარმოადგენს მხოლოდ პირველის გამოსახვას.

მუდმივი მაგნიტების ელექტრომაგნიტებით შეცვლის შემდეგ გენერატო-
რის განვითარებაში მომდევნო ეტაპს წარმოადგენს თვითაგზნება. თვითაგზ-



ნახ. 64. ბ. ს. იაკობის ელექტრული ძრავი.



ნახ. 65. პიკის გენერატორი.

ნების იდეა პირველად გამოთქმული იყო დანიელ ს. ხიორტის (S. Hjorth) მი-
ერ 1852 წ.ს. მაგრამ ამ იდეამ მხოლოდ 1867 წ. ვ. სიემსის (W. Siemens)
მანქანებში მიიღო მოხერხებული პრაქტიკული გადაწყვეტა.

ელექტრული მანქანების განვითარების საწყისი პერიოდი დაკავშირებულ-
ლია უმთავრესად მუდმივ დენთან, ვინაიდან გენერატორის ელექტრული ენერ-
გიის მომხმარებლებს თავდაპირველად წარმოადგენდა გალვანოალასტიკის და-
ნადგარები, შემდეგ რკალური ელექტრული ნათურები, ძრავებისათვის კი, დე-
ნის წყაროდ გამოიყენებოდა გალვანური ელემენტები. გენერატორმა, რომე-
ლიც შემოვიდა ელექტროძრავის შემდეგ, თავის განვითარებაში სწრაფად
გაუსწრო უკანასკნელს. ამის მიზეზს წარმოადგენდა ელექტრული განათება.
მსხვილმა მრეწველობამ, ეყრდნობოდა რა ორთქლის ენერჯიას, გამოიწვია
მოსახლეობის კონცენტრაცია ქალაქებში. ქალაქების ზრდა მოითხოვდა განა-
თების ახალ წყაროებს. მე-19 საუკუნის 70-იან წლებში ელექტრული განათება
ელექტრული ენერჯიის მთავარი მომხმარებელი ხდება. განათების დანადგარე-

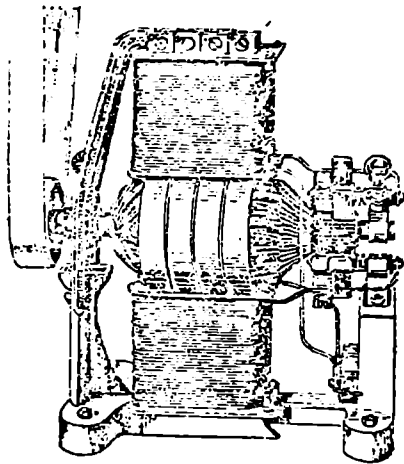
ბისათვის აუცილებელი იყო კვების ახალი მძლავრი წყაროს გამოჩენა. ამან უზრუნველყო მუდმივი დენის გენერატორების სწრაფი განვითარება და მათი სიმძლავრის ზრდა. 1860 წ. ა. პაჩინოტი (A. Pacinotti) მოგვცა რგოლისებური კბილოვანი ლუხა მრავალხვევიანი გრაგნილით.

1860 წ. ვ. სიმენსმა გამოიყენა თვითაგზნების პრინციპი მიმდევრობითი აგზნების გენერატორებისათვის, რომელთაც ამის შემდეგ სწრაფი და ფართო გავრცელება მიიღეს განათების დანადგარებში.

1867 წ. დ. კ. მაქსველმა (I. C. Maxwell) მოგვცა თვითაგზნების მანქანის მათემატიკური თეორია. ეს შრომა წარმოადგენს პირველ ფუნდამენტალურ შრომას ელექტრული მანქანების თეორიაში.

1870 წ. ზ. ტ. გრამმა (Z. T. Gramm) ე. ლ. შ. დივერნუსთან (E. L. S. d'Ivernoi) ერთად, გაიმეორა რა ა. პაჩინოტის დავიწყებული წინადადება, ააგო მანქანა რგოლური ლუხით, რომელმაც ამის შემდეგ სწრაფად განდევნა ცხაღ-პოლუსიანი ლუხა. გამოყენებული იმ დრომდე მუდმივი დენის მანქანებში.

1873 წ. ფ. ჰენერ-ალტენეკის მიერ (F. Nefer-Alteneck) ვ. სიმენსთან ერთად კონსტრუირებული იქნა მანქანა დოლისებური ლუხით (ნახ. 66). აპგერად, 70-იან წლებში მუდმივი დენის მანქანამ შეიძინა თანამედროვე მანქანის ძირითადი კონსტრუქციული ელემენტები. ელექტროძრავების პირველი მსხვილი შომზპარბელი იყო ქალაქის ელექტრული ტრანსპორტი. 1879 წ. ვ. სიმენსმა ბერლინის გამოფენაზე პირველი ელექტრული რკინიგზის დემონსტრაცია მოახდინა. გენერატორი და ძრავი ამ დანადგარში იყო მიმდევრობითი აგზნების.



ნახ. 66. ფ. ჰენერ-ალტენეკის და ვ. სიმენსის მანქანა დოლური ლუხით.

1882 წ. ს. მ. დეპრემ (M. Deprez) თავისი დანადგარით მიუნხენის გამოფენაზე დაამტკიცა მუდმივი დენის ელექტრული ენერჯის დიდ მანძილზე (57 km) გადაცემის შესაძლებლობა.

ამან საბოლოოდ განამტკიცა ძრავებისა და გენერატორების შემდგომი განვითარების წარმატება.

ორთქლის მანქანის ჰევეზონიამ განიცადა გამანადგურებელი დარცხმა. ამასთან ერთად ეს მოასწავებდა ახალი ეტაპის დასაწყისს საზოგადოების საწარმოო ძალების განვითარებაში და მათ გოგრაფიულ განაწილებაში. აი რას წერდა ფ. ენგელსი 1893 წ. 1/III მ. დეპრეს ცდების შესახებ: „ეს აზნავე მართლა დიდი რევოლუციონური მნიშვნელობის მოვლენაა: ორთქლის მანქანის

საშუალებით ჩვენ აქამდის ვიყენებდით სითბოს, როგორც მექანიკურ მამოძრავებელ ძალას, აწი კი ელექტრონის გამოყენებაში გვეხსნება ახალი გზები. გვეძლევა საშუალება, რომ ენერჯის ყველა ფორმები—სითბო, მექანიკური მოძრაობა, ელექტრული ძალა, მაგნეტიზმი, სინათლე—ერთი მეორედ გადავაქციოთ, და პირიქით, და ეს ენერჯია მრეწველობაში გამოვიყენოთ, რკალი აქ ახლა უკვე ჩაკეტილია. დეპრეს უჯანასკნელ გამოგონებაში ჩვენ გვაქვს ის მიღწევა, რომ უმაღლესი ძაბვის ელექტრული ტალღა (დენი) მცირეოდენ ენერჯის დაკარგვით გადაიციემა აქამდის წარმოდგენელ სიშორეზე ტელეგრაფის უბრალო მავთულებით. ეს ჯერ ახალი საქმეა და საბოლოოდ ასეთი აღმოჩენა მრეწველობას გაანთავისუფლებს ყოველგვარი ადგილობრივი ზღუდეებისაგან, შესაძლებლობას გახდის უშორესი მანძილებიდანაც წყლის ძალის გამოყენების. პირველად ამას უდიდესი მნიშვნელობა ექნება ქალაქისათვის, მერე და მერე ეს გამოდგება ისეთ საწარმოო იარაღად, რომელიც ხელს შეუწყობს ქალაქის და სოფლის დაახლოვებას, მოსპობს მათ შორის ანტაგონიზმს. ცხადია, აგრეთვე რა თქმა უნდა, რომ ეს გამოგონება სარჩულად დაედება საერთო საწარმოო ძალთა გაფართოება-გაძლიერებას და ამის მიხედვით სულ უფრო და უფრო ზემდეტი შეიქმნება ბურჟუაზიის ხელმძღვანელობა წარმოებაში¹.

მრეწველობის ცალკეული დარგების და საქალაქო მეურნეობის გაზრდილობა მოთხოვნილებამ მუდმივი დენის გენერატორებზე და ძრავებზე, მალე გამოაგონა მათთვის დამახასიათებელი ნაკლოვანებანი, რომლებიც ხელს უშლიდნენ მათ ფართო გავრცელებას. ენერჯის მანძილზე გადაცემის მიყვადით მანქანის ძაბვის რამდენიმე ათას ვოლტამდე აწევის აუცილებლობამდე. ეს წარმოადგენდა დიდ სიძნელეებს და ხშირ ავიარიებს იწვევდა. გარდა ამისა, მანქანების მუშაობას ხელს უშლიდა ცუდი კომუტაცია. ამით უნდა აიხსნას 80-იან წლებში იმ დროის ელექტროტექნიკოსების თანდათანობით გაძლიერებული ინტერესი ცვლადი დენის მიმართ.

1882 წ. გამოფენაზე მოსკოვში ი. ფ. უსაგინის მიერ დემონსტრირებულ იქნა მის მიერ ელექტრული განათების მიზნებისათვის აგებული ტრანსფორმატორი. ერთფაზა ცვლადი დენის გენერატორები ცნობილი იყო ადრეც. ჩაკეტილი მაგნიტური სისტემის მქონე ერთფაზა ტრანსფორმატორების ფართო გამოყენების დასაწყისი დაკავშირებულია უნგრული ფირმა განსი და კომპანიის ინჟინრების ო. ტ. ბლატის (O. T. Blathy), მ. დერის (M. Dérie) და კ. ციპერნოვსკის (C. Zipernowsky) სახელთან, რომლებმაც პირველმა დაამუშავეს ლეროვანი (ნახ. 67) და ჯავშნიანი (ნახ. 68) ტრანსფორმატორების კონსტრუქციები და შემოიღეს ტერმინი „ტრანსფორმატორი“.

1883 წელს მ. დეპრემ პარიზის მეცნიერებათა აკადემიაში წარადგინა შრომა, რომელიც ამტკიცებდა ორფაზა დენის საშუალებით მბრუნავი მაგნიტური არეს შექმნის შესაძლებლობას. იგივესაკითხი მოგვიანებით გამოკვლეულ იქნა გ. ფერარისის (G. Ferraris) და ნ. ტესლას (N. Tesla) შრომებში (1886 წ.), რომლებმაც ერთმანეთისაგან დაპოუყიდებლად შეძლეს აეგოთ ორფაზა ასინ-

¹ შარქსი, ენგელსი, ლენინი, სტალინი „ტექნიკის შესახებ“—1934 გვ. 178—79 ფრ. ენგელსი—წერილი ბერშტეინსადაში.

ქრონული ძრავი. განსაკუთრებით ფართო გავრცელება ააინქრონულმა ძრავმა ჰპოვა მას შემდეგ, რაც 1891 წელს მ. დოლივო-დობროვოლსკიმ ააგო სამფაზა-ძრავი. ამ ძრავს ქონდა თანამედროვე ასინქრონული მანქანის ყველა ძირითადი კონსტრუქციული ელემენტი (ნახ. 69).

ტრანსფორმატორების და ასინქრონული ძრავების განვითარებასთან ერთად ხდებოდა ცვლადი დენის გენერატორების სრულყოფა.

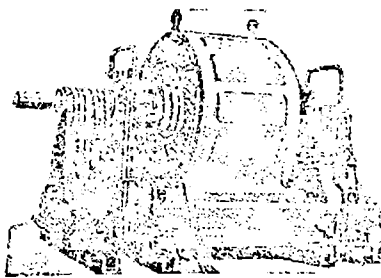
1890 წელს ო. ფონ-მილერის (O. von Miller) ინიციატივით შეუდგნენ სამფაზა დენის პირველ მაღალვოლტიან ელექტროგადამცემი ხაზის აგებას ლაუფენიდან მაინის ფრანკფურტამდე სიგრძით 175 km. ლაუფენში ჰიდროტურბინა აბრუნებდა 300 ცხენის ძალის სიმძლავრის, 55V ძაბვის და 30+40 Hz — სიხშირის მქონე სამფაზა დენის გენერატორს (ნახ. 70). გენერატორის ძაბვა სამფაზა ტრანსფორმატორის საშუალებით აიწეოდა 30 000 V-მდე. ფრანკფურტში მეორე ტრანსფორმატორი ამცირებდა ძაბვას 65 V-მდე, რომელიც მიიყვანებოდა მ. დოლივო-დობროვოლსკის სამფაზა ასინქრონულ ძრავთან და განათების დატვირთვის-



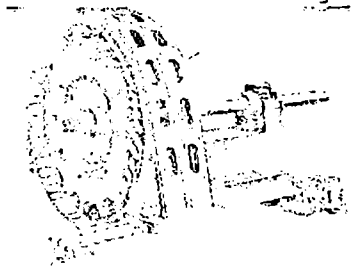
ნახ. 67. ო. ბლატის, მ. დერის და კ. ციპერ-ნოესკის ლეროვანი ტრანსფორმატორი.



ნახ. 68. ო. ბლატის, მ. დერის და კ. ციპერნოესკის ჯაგშნაინი ტრანსფორმატორი.



ნახ. 69. მ. დოლივო-დობროვოლსკის სამფაზა ასინქრონული ძრავი.

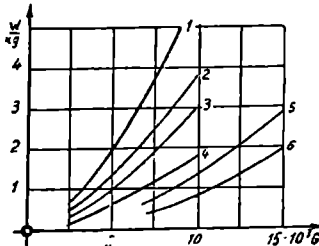


ნახ. 70. ქ. ლაუფენის ელექტროსადგურში დაყენებული სამფაზა დენის გენერატორი.

თან. ამ ელექტროგადამცემის შეუფერხებელ მუშაობას გადაწყვეტი მიიღწეოდა ქონდა სამფაზა დენის სწრაფი გავრცელებისათვის. მუდმივმა დენმა დაიწყო გადასვლა მეორე პლანზე.

80-იანი წლების ბოლოს და 90-იანი წლებში ელექტროსადგურების, განსაკუთრებით ცვლადი დენის სადგურების სწრაფი განვითარება, მოითხოვდა ახალ სწრაფმავალ პირველად ძრავებს მათი გენერატორებთან უშუალოდ შე-

ერთებისათვის. ნელმავალი ორთქლის მანქანები წინსვლით-უქუქცევეთი მოძრაობით არ აკმაყოფილებდნენ ამ მოთხოვნილებებს. ამან გამოიწვია საკონსტრუქტორო აზრის გაძლიერებული მუშაობა, რის შედეგად შეიქმნა და



ნახ. 71. სატრანსფორმატორო ფოლადის ხვედრითი დანაკარგების შეცვლა 1892 წლიდან დღემდე. 1-1892 წ., $\Delta=0,5$ მმ მ. დოლოვი-დობროვოლსკის მიხედვით; 2-1895 წ. $\Delta=0,5$ მმ (საშუალო ხარისხი), გ. კაპის მიხედვით; 3-1895 წ. $\Delta=0,5$ მმ (უმაღლესი ხარისხი) გ. კაპის მიხედვით; 4-1908 წ. $\Delta=0,35$ მმ (უმაღლესი ხარისხი) კ. პიხელმაიერის მიხედვით; 5-თანამედროვე, $\Delta=0,35$ მმ (საშუალო ხარისხი), 6-თანამედროვე $\Delta=0,35$ მმ (უმაღლესი ხარისხი).

სწრაფად სრულყოფილ იქნა ორთქლის ტურბინა. უკვე 90-იან წლების დასაწყისში დადგმულ იქნა 1000 kw-ზე მეტი სიმძლავრის ტურბოგენერატორები. გენერატორების სიმძლავრეების ზრდის გამო—მათ სწრაფმავლობასთან დაკავშირებული იყო აგრეთვე ცვლადი დენის სტანდარტული სიხშირის საკითხი. 90-იან წლებში, რიგი დანადგარების აგების შემდეგ სხვადასხვა სიხშირეზე ზღვრებში 15-დან 133 $\frac{1}{3}$ Hz-მდე, ცვლადი დენის სიხშირე თანდათან სტაბილიზირებული იქნა. სამრეწველო დანადგარებისათვის ევროპაში მიღებულ იქნა სიხშირე 50 Hz, აშშ-ში 60-Hz.

პრეწველობის და ტრანსპორტის გაზრდილმა მოთხოვნილებებმა ელექტრული ენერჯისადმი, როგორც ძირითად ძრავად ძალისადმი, განაპირობა 90-იან წლებში ელექტრული მანქანების ახალი ტიპების შექმნა. შეიქმნა ერთლუხა გარდამსახები, მუდმივი დენის და-

ნადგარები (ტრამვაი და სხვა) ცვლადი დენის ქსელიდან საკვებად. აგრეთვე ცვლადი დენის კოლექტორული ძრავები, თუცა მათ დასაწყისში მცირე გავრცელება ჰპოვეს. XIX და XX საუკუნეების მიჯნაზე დასრულდა ელექტრული მანქანების განვითარების პირველი პერიოდი. დროის ამ მომენტისათვის უკვე შექმნილი იყო მანქანების ყველა ძირითადი ტიპები. აგრეთვე დაიშუშებულ იყო ელექტრული მანქანების თეორიის საფუძვლები და მათი გაანგარიშებისა და პროექტირების მეთოდები.

XX საუკუნე წარმოადგენს მეორე პერიოდს ელექტრული მანქანების ისტორიაში. ეს პერიოდი ხასიათდება მრეწველობის და ტრანსპორტის სწრაფი განვითარებით ელექტროფიკაციის ბაზაზე. ამიტომ სულ უფრო იზრდება მოთხოვნილება ელექტრული მანქანისადმი, მისი ეკონომიურობის გაზრდისა და წონებისა და გაბარიტების შემცირების თვალსაზრისით. საჭირო გახდა სამეცნიერო-საკვლევო მუშაობის ფართოდ გაშლა ელექტრომაგნიტური და თბური პროცესების შესასწავლად, რომლებსაც ადგილი აქვთ ელექტრულ მანქანებში,¹ ახალ საიზოლაციო მასალების გამოსაძებნად და დინამიკურ ფურცლოვან ფოლადის თვისების გასაუმჯობესებლად (ნახ. 71).

¹ ელექტრული მანქანების თეორიის განვითარებისათვის განსაკუთრებით დიდი მნიშვნელობა ეკუთვნის ა. ბონდელის (A. Bondel) კ. შტეინმეტცის (C. Steinmetz), ე. არნოლდის (E. Arnold), ი. ლ. ლაურის (I. L. La Cour), რ. რიხტერის (R. Richter), ლ. დრეიფუსის (L. Dreuflus), რ. რუდენბერგის (R. Ruedenberg), პ. პარკის (P. H. Park) და სხვა შრომებს.

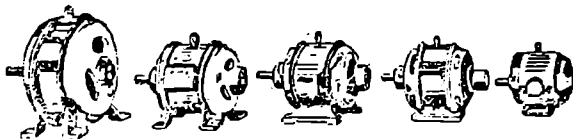
1900 წლიდან დაწყებული, ტრანსფორმატორების, სინქრონული, ასინქრონული მანქანების და მუდმივი დენის მანქანების მოწყობის პრინციპები ოჩნება უცვლელი. იცვლება მხოლოდ მათი გარე ხედი, მცირდება წონები და გაბარიტები და იზრდება მათი ეკონომიურობა. მრეწველობის და ტრანსპორტის მოთხოვნილებათა ცვლილებასთან ერთად, იზრდება აგრეთვე მანქანების კონსტრუქციული შესრულების ასორტიმენტი. მანქანების ევოლუცია მისი ისტორიული განვითარების მეორე პერიოდში ნათლად ილუსტრირებული ცხრ. 9 და 10 მონაცემებით.

ცხრილი 9

3,7 kW 1500 ბრ.წუთ. მოკლედ შერატულ როტორიანი ასინქრონული ძრავის წონის ცვლილება 1889—1930 წ. პერიოდში AEG-ს ფირმის მონაცემების მიხედვით

გამოშვების წელი	1889	1901	1924	1929	1930
ტიპი	kD-50	D-50	VDN-40	AVDN-40	DA-30
სიმძლავრე kW-ში	3,7	3,7	4,05	3,3	3,7
წონა kG-ში	155	108	83	62	42
წონა 1 kW-ზე kG-ში	41,9	29,2	20,5	18,8	11,3

გაბარიტები



ცხრილი 10

გენერატორების, ძრავების და ტრანსფორმატორების წონების ცვლილება 1900—1920 წ. პერიოდში

მანქანებები	მაქანის გვარობა					
	გენერატორი		ძრავი		ტრანსფორმატორი	
გამოშვების წელი	1900	1920	1900	1920	1900	1920
სიმძლავრე	3000 kVA	3000 kVA	148 kW	148 kW	1200 kVA	1200 kVA
ბრუნებათა რიცხვი წუთში	83	83	187	187	—	—
წონა kG-ში	127000	71 000	10020	4 180	13600 ¹	5250 ¹
წონა პროცენტებში	100	56	100	41	100	38,5 ¹


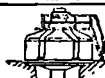






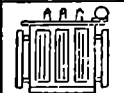


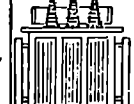

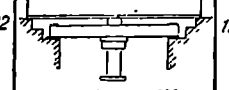
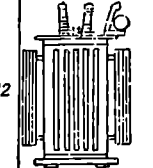
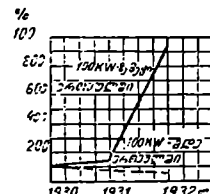
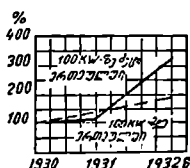
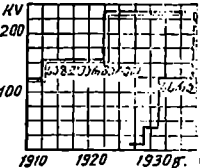
1900 წლიდან დაწყებული ელექტრული მანქანების განვითარების ფრიალ დაძაბასათებელ თავისებურებას წარმოადგენს ცალკეული ერთეულების სიმძლავრის ზრდა. ელექტრული ენერჯიის წარმოების კონცენტრაცია და მისი ვადაცემა დიდ მანძილზე მოითხოვდა გენერატორების და ტრანსფორმატორების სიმძლავრის გაზრდას. თუ 1900 წ. გენერატორების და ტრანსფორმატორების სიმძლავრე არ აღემატებოდა 5000 KVA-ს ერთ ერთეულში, ეხლა უკვე იგი აღწევს 200 000 KVA²-მდე, ე. ი. გაიზარდა ორმოცჯერ. სიმძლავრის ზრდასთან ერთად იზრდებოდა ძაბვაც. ასე, მაგალითად, ა. შ. შ. 1900 წელს

¹ ბაზს ზევით. წონა უხეთით, ბაზის ქვეით—ზეით.
² ასეთი სიმძლავრის ტრანსფორმატორები სრულდება სამი ერთეულის სახით, რომლებიც შეერთებული არის სამეზაბა ჯგუფად.

ტრანსფორმატორის ზღვრული ძაბვა იყო 60 kV, დღეს კი 290 kV. ცვლადი დენის თანამედროვე გენერატორების მაქსიმალური ძაბვა 35 kV-ს აღწევს.

ცხრილი 11

ელექტრომანქანათმშენებლობის განვითარება პირველი ხუთწლიური პერიოდში

ტურბოგენერატორები		ჰიდროგენერატორები		ტრანსფორმატორები	
წარმოების წელი	ერთეულის უდიდესი სიმძლავრე	წარმოების წელი	ერთეულის უდიდესი სიმძლავრე	წარმოების წელი	ერთეულის უდიდესი სიმძლავრე
1924	 5000 kW	1926	 8.790 კვანტის 4.000 kW	1928	 650 kVA
1927	 5000 kW	1926	 ჰიდროპონის 7000 kW	1929	 1680 kVA
1928	 10000 kW	1932	 სპირის 24000 kW	1930	 6600 kVA
1930	 24000 kW	1932	 დნეპრის 62000 kW	1931	 15000 kVA
1931	 50000 kW	1932	 372000 kVA	1932	 372000 kVA
მულტიპლი დენის მანქანების გამოშვება		ცვლადი დენის ძრავების გამოშვება		ძალიან ტრანსფორმატორების ძაბვის ზრდა	
 <p>% 100 80 60 40 20 1930 1931 1932წ</p>		 <p>% 400 300 200 100 1930 1931 1932წ</p>		 <p>kV 200 100 1910 1920 1930წ.</p>	

საბჭოთა კავშირში ელექტრომანქანათმშენებლობის განვითარების თავი

სებურებას წარმოადგენს მისი განსაკუთრებით სწრაფი ტენკები. მეფის რუსეთში საკუთარი ელექტრომრეწველობა არ არსებობდა, ამიტომ საბჭოთა ხელისუფლების წლებში ჩვენს ელექტრომრეწველობას მოუხდა იმ გზის გალა, რომელსაც საზღვარგარეთული ტექნიკა გადიოდა თითქმის ნახევარი საუკუნის განმავლობაში.

ვ. ი. ლენინის ინიციატივით 1920 წ. თებერვალში შეიქმნა სახელმწიფო კომისია რუსეთის ელექტროფიკაციის გეგმების დასამუშავებლად (გოვლო). გეგმა შედგენილი იყო და იმავე წლის დეკემბერში დამტკიცებული სრულიად რუსეთის საბჭოების VIII ყრილობის მიერ. გოვლო-ს გეგმა, რომელიც გათვალისწინებული იყო 10—15 წელზე, წარმოადგენდა რუსეთის სახალხო მეურნეობის სოციალისტური რეკონსტრუქციის და აღდგენის გეგმას ელექტროფიკაციის საფუძველზე. ამ გეგმის რეალიზაციამ მოითხოვა საკუთარი ელექტრომრეწველობის შექმნა. ელექტრომანქანათმშენებლობამ დაიწყო განვითარება, უმთავრესად მოსკოვში (ქარხანა „დინამო“) ლენინგრადში (ქარხანა „ელექტროსილა“) და ხარკოვის (ხმმზე) ქარხნებში, რომლებიც ადრე ეკუთვნოდნენ საზღვარგარეთულ ფირმებს. საჯირო გახდა ამ ქარხნების სრული რეკონსტრუქცია და გაფართოება, ელექტრული მანქანების ახალი ტიპების დამუშავება ომის წინანდელი (1910—1913 წ. წ.) მოძველებული მანქანების ნაცვლად, საკირო გახდა, მუშების, ტექნიკოსების და ინჟინრების ახალი ახალგაზრდა კადრები სწრაფმზარდი წარმოებისათვის.

მტრების გაიძვერობის მიუხედავად, რომლებიც ცდილობდნენ ყოველი ძალებით დაემუხრტებიათ საკუთარი ენერგეტიკული ბაზის შექმნა სსრკ-ში, საბჭოთა ახალგაზრდა ელექტრომრეწველობამ ღირსეულად დასძლია მის წინაშე დასმული ძნელი ამოცანები და მნიშვნელოვნად შეუწყო ხელი გოვლო-ს გეგმის გადაჭარბებას უკვე 1931 წლისათვის. სწრაფად ითვისებდა რა ელექტრული მანქანების ახალ ტიპებს, ფართოდ ნერგავდა წარმოებაში შრომის სოციალისტურ ფორმებს და გააფართოვა რა სტაბანოეური მოძრაობა, სსრკ ელექტრომანქანათმშენებლობის მრეწველობამ პირველი ორი სტალინური ხუთწლედის შედეგად ხარისხობრივად და რაოდენობრივად უკვე მიღწია მოწინავე თანამედროვე ტექნიკის დონეს (ცხრ. 11). ელექტრული მანქანების ყველა ძირითადი ტიპები უდიდესი გენერატორები და ტრანსფორმატორები, ცვლადი და მუდმივი დენის ძრავები—შზადდება სსრკ ქარხნებში. მათი მახასიათებლები ბევრ შემთხვევებში აღემატებიან საუკეთესო საზღვარგარეთულ ნიმუშებს.

ელექტრომანქანათმშენებლობის მრეწველობაში მომუშავე მუშების და ინჟინერ-ტექნიკოსთა კადრების ფართო შემოქმედებითი ინიციატივა და სამეცნიერო ტექნიკური აზრის მდგომარეობა უზრუნველყოფს ელექტრომანქანათმშენებლობის შემდგომ წარმატებით განვითარებას, მსოფლიოში უდიდესი ჰიდროგენერატორების, ტრანსფორმატორების და უახლესი ელექტრომოტორული მოწყობილობის შექმნას მრეწველობის ყველა დარგების ფართო ელექტროფიკაციისათვის, ტრანსპორტისა და სასოფლო-მეურნეობისათვის, სსრკ სახალხო მეურნეობის განვითარების მესამე ხუთწლიანი გეგმის შესაბამისად.

II. ტრანსფორმატორები

I ნაწილის §-4-ში განხილული იყო ტრანსფორმატორების მუშაობის პრინციპი და მოწყობილობა. ეხლა გადავიდეთ ტრანსფორმატორების მუშაობის უფრო დაწვრილებით გამოკვლევაზე და მათი თანამედროვე კონსტრუქციების აღწერაზე.

წინასწარ დავადგინოთ ტრანსფორმატორების მუშაობის დამახასიათებელი ძირითადი ნომინალური სიდიდეები.

ასეთი სიდიდეებია:

1. ტრანსფორმატორის სიმძლავრე V_A -ში ან KVA -ში.
2. თვითეული გრაგნილის ხაზური ძაბვები უქმი სვლის დროს V -ბში ან KV -ბში.

3. ხაზური დენები A -ში ნომინალური სიმძლავრისას.

4. სიხშირე.

5. ფაზათა რიცხვი.

6. გრაგნილების შეერთების სქემა და ჯგუფი (იხ. § 9, ზ).

7. მოკლედ შერთვის ძაბვა, რომელიც ახასიათებს ძაბვის ეარდანს გრაგნილებში (იხ. § 8, ზ).

8. მუშაობის რეჟიმი, რომელიც უჩვენებს იმას, რომ ტრანსფორმატორი გაბურებაზე გათვლილია, ხანგრძლივ თუ ხანმოკლე მუშაობაზე, ნომინალური სიმძლავრისას.

9. გაცივების საშუალება (იხ. § 18, თ).

ყველა ეს სიდიდეები ნაჩვენებია ტრანსფორმატორებზე დამაგრებულ ფირფიტაზე—(დაფაზე).

გარდა ამისა—ფირფიტაზე მოყვანილია დამატებითი მონაცემები, რომლებიც აუცილებელია ტრანსფორმატორის მონტაჟისა და ექსპლოატაციისათვის:

1. ტრანსფორმატორის სრული წონა

2. ზეთის წონა

3. ტრანსფორმატორის „ამოსაღები“ (შინაგანი, ზეთში ჩაშვებული). ნაწილის წონა.

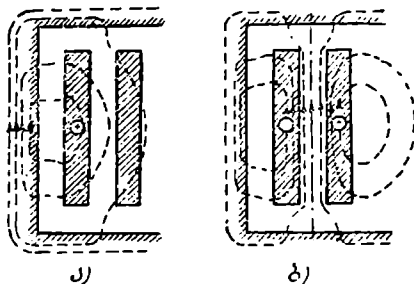
8. ტრანსფორმატორის მუშა პარამეტრი

ა) მუშა პროცესის ზოგადი დახასიათება. ერთფაზა ტრანსფორმატორში და სამფაზა ტრანსფორმატორის ყოველ ფაზაში მუშა პროცესი პრაქტიკულად ერთნაირად მიმდინარეობს, ამიტომ თავდაპირველად ჩვენ დავეყვარებით პროცესის გამოკვლევით ერთ ფაზაში.

თუ ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილს მივაერთებთ ცვლადი დენის წყაროსთან, მეორად გრაგნილს კი ჩაკეტავთ ენერგიის რომელიმე მიმღებზე, მაშინ ტრანსფორმატორში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები შეიძლება წარმოდგენილ იქნას შემდეგი სახით.

პირველადი და მეორადი გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალა $i_1\omega_1 + i_2\omega_2$, ქმნის მაგნიტურ ველს ფოლადის გულანაში და მის გარეთ. ველის ინდუქციური ხაზები გულანას შიგნით, შებმული არის პირველადი და მეორადი გრაგნალების ყველა ხვევებთან. ველის ინდუქციური ხაზები გულანას გარეთ, ჩვეულებრივად შებმულია თვითეული გრაგნილის ხვევების ნაწილთან.

ნახ. 72, ა-ზე სქემატურად ნაჩვენებია ველის ინდუქციური ხაზების განაწილება ხვევისათვის, როდესაც $i_2 = 0$ და დენი გადის მხოლოდ პირველად გრაგნილში, ნახ. 72, ბ-ზე კი შემთხვევისათვის, როდესაც დენები გადის ორივე



ნახ. 72. მაგნიტურ ველის ინდუქციური ხაზების შესაძლო განაწილება გულანას გარეთ.

ა) $i_2 = 0$; ბ) $i_1\omega_1 = -i_2\omega_2$.

გრაგნილებში და $i_1\omega_1 = -i_2\omega_2$. აღენიშნოთ მაგნიტური ნაკადი, რომლის ინდუქციური ხაზები შებმულია თვითეული გრაგნილის ყველა ხვევებთან Φ -ით, მაშინ ამ ნაკადის დროის მიხედვით ცვლილება პირველად და მეორად გრაგნილებში აღძრავს სათანადოდ ე. მ. ძ-ს.

$$e_1' = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (8,1)$$

$$e_2' = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (8,2)$$

ამ ნაკადის მაგნიტური შებმის რიცხვი გრაგნილებთან სათანადოდ უტლია:

$$\Psi_1' = \omega_1 \Phi; \quad (8,3)$$

$$\Psi_2' = \omega_2 \Phi. \quad (8,4)$$

ამიტომ

$$\frac{\Psi_1'}{\Psi_2'} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (8,5)$$

მაგნიტური ველის ინდუქციური ხაზები, რომლებიც მთლიანად ან ნაწილობრივ გადის ტრანსფორმატორის გულანას, გარეთ, პირველად და მეორად გრაგნილებთან შექმნის მაგნიტურ შებმებს ტოლს Ψ_1' და Ψ_2' , ამასთან ზო-

გად შევთხვევანი ინდუქციური ხაზების გრაგნილების ხევეებთან არათანაბარო შებმის განო

$$\frac{\Psi_1''}{\Psi_2''} \neq \frac{w_1}{w_2} \quad (8,6)$$

Ψ_1'' და Ψ_2'' ნაკადშებმების დროის მიხედვით ცვლილებისას გრაგნილებში აღიძვრებიან ე. შ. ძ-ბი:

$$e_1'' = -\frac{d\Psi_1''}{dt}; \quad (8,7)$$

$$e_2'' = -\frac{d\Psi_2''}{dt}. \quad (8,8)$$

ანის განო რეზულტიური ე. შ. ძ-ბი გრაგნილებში იქნება ტოლი:

$$e_1 = e_1' + e_1''; \quad (8,9)$$

$$e_2 = e_2' + e_2''. \quad (8,10)$$

ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილთან მოყვანილი ძაბვა u_1 მუდამ იქნება გაწონასწორებული $i_1 r_1$ ძაბვის ვარდნით გრაგნილის აქტიურ წინააღმდეგობაში და e_1 ე. შ. ძ-ით.

$$u_1 = -e_1 + i_1 r_1. \quad (8,11)$$

ძაბვა მეორადი გრაგნილის მომკერებზე ტოლი იქნება, ამ გრაგნილში აღძრული e_2 ე. შ. ძ-სა, $i_2 r_2$ აქტიური ძაბვის ვარდნის გამოკლებით:

$$u_2 = e_2 - i_2 r_2. \quad (8,12)$$

ტრანსფორმატორის გრაგნილებში აღძრული ე. შ. ძ-ბი დატვირთვის (მეორადი დენის) ცვლილების დროს, შედარებით მცირედ იცვლება, ეს ჩანს შემდეგიდან.

სინამდვილესთან დიდი მიახლოებით დავუშვათ, რომ u_1 ძაბვა, e_1 ე. შ. ძ და i_1 დენი იცვლება სინუსოიდურად. მაშინ (8,11) ტოლობის საფუძველზე შეიძლება დაიწეროს

$$-E_1 = U_1 - I_1 r_1 \quad (8,13)$$

ტრანსფორმატორის დატვირთვის ჩვეულებრივ პირობებში $I_1 r_1$ —ძაბვის ვარდნა პირველადი გრაგნილის აქტიურ წინააღმდეგობაში, გაცილებით მცირეა მოდებულ U_1 ძაბვასთან შედარებით, ამიტომ თუ $U_1 = \text{const}$, დატვირთვის რყევის დროს E_1 უმნიშვნელოდ იცვლება, და მაშასადამე მაგნიტური არეს შემქმნელი სრული დენის ეფექტური მნიშვნელობა $I_1 w_1 + I_2 w_2$ ასევე—თითქმის უცვლელი რჩება.

რამდენადაც ტრანსფორმატორის კვება ზდება პირველადი გრაგნილიდან, რეზულტიური დამამაგნიტებელი ძალა შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც

პირველად გრაგნილში განავალი რაღაც დამამაგნიტებელი დენი i_0 გამრავლებული w_1 ხვევათა რიცხვზე:

$$i_0 w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2. \quad (8,14)$$

ამ ტოლობიდან მივიღებთ:

$$i_1 = i_0 - i_2 \frac{w_2}{w_1}. \quad (8,15)$$

მაშასადამე, ტრანსფორმატორის პირველადი დენი შეგვიძლია განვიხილოთ, როგორც შემდგარი ორი მდგენელისაგან: i_0 —დამამაგნიტების დენისაგან და $-i_2 \cdot \frac{w_2}{w_1}$ დენისაგან, რომელიც გაპირობებულია ტრანსფორმატორის დატვირთვით. როდესაც დატვირთვა ირა გვაქვს (უქმი სვლა) $i_2 = 0$ და მთელი პირველადი დენი $i_1 = i_0$ —არის დამამაგნიტებელი. დატვირთვის დროს i_2 ნეორადი დენის დამამაგნიტებელი მოქმედება თითქმის მულიანად კომპენსირებულია — პირველადი გრაგნილის — $i_2 \frac{w_2}{w_1}$ მდგენელით.

განვიხილოთ დამოკიდებულება სინუსოიდურად ცვლად Φ მაგნიტური ნაკადსა და მის მიერ აღძრულ ე. მ. ძს შორის.

მივიღოთ, რომ $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$.

მაშინ

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -w \Phi_m \omega \cos \omega t = w \Phi_m \omega \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

აქედან გამომდინარეობს, რომ აღძრული ე. მ. ძ. ასევე სინუსოიდური იქნება, მისი ამპლიტუდური მნიშვნელობა ტოლი იქნება:

$$E_m = w \Phi_m \omega = w^2 k_m 2\pi f,$$

ხოლო ეფექტური მნიშვნელობა:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} w^2 k_m = 4,44 w f \Phi_m.$$

აღძრული ე. მ. ძ. ფაზით ჩამორჩენილი იქნება მაგნიტური ნაკადისაგან $\frac{\pi}{2}$ კუთხით, ესე იგი კვადრატურაში იქნება მასთან. თუ ტრანსფორმატორის ფოლადის გულანაში მაგნიტური ნაკადი ტოლია Φ_m -ს, მაშინ გულანას S_c კვეთში B ინდუქციის საშუალო მნიშვნელობა ტოლი იქნება: $B = \frac{\Phi_m}{S_c}$.

ბ) ტრანსფორმატორის დიფერენციალური განტოლებები. ტრანსფორმატორში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები ხარისხობრივ და რაოდენობრივი მხრივ ადვილად შეიძლება იქნეს აღწერილი დიფერენციალურ და ვექტორულ განტოლებათა სისტემის საშუალებით.

თავდაპირველად განვიხილოთ ტრანსფორმატორის მუშაობა ფოლადის გულანას გავლენის აღრიცხვის გარეშე, ე. ი. ჩავთვალოთ, რომ მაგნიტურ ნაკადებსა და მათ შემქმნელ დენებს შორის არსებობს სწორხაზოვანი დამოკიდებულება და ფოლადში დანაკარგები არ არის. ასეთ პირობებს მაგ. პთლიანად აკმაყოფილებენ ეგრეთწოდებული „საპაერო“ ტრანსფორმატორები, რომლებშიაც გრაგნილებს შორის მაგნიტური კავშირი განხორციელებულია საერთოდ ფოლადის გულანას გარეშე.

აღვნიშნავთ რა სათანადოდ L_1, M_{12}, L_2, M_{21} , გრაგნილების ინდუქტიობას და ურთიერთინდუქტიობას, დავწერთ ტრანსფორმატორის პირველად და მეორად წრედებისათვის დიფერენციალურ განტოლებათა შემდეგ სისტემას:

$$u_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} - M_{12} \frac{di_2}{dt} = i_1 r_1; \quad (8,16)$$

$$u_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} - M_{21} \frac{di_1}{dt} - i_2 r_2. \quad (8,17)$$

(8,14) განტოლებიდან მივიღებთ:

$$i_2 = i_0 \frac{w_1}{w_2} - i_1 \frac{w_1}{w_2}$$

$$i_2 = i_0 k_{12} - i_1 k_{12} \quad (8,18)$$

და მივიღებთ რა, რომ $\frac{1}{k_{12}} = k_{21}$,

$$i_1 = i_0 - i_2 k_{21}. \quad (8,19)$$

გამოვირიცხავთ რა (8,18) და (8,19) განტოლებების საშუალებით (8,16)-დან i_2 დენს და (8,17)-დან i_1 -ს მივიღებთ:

$$u_1 - (L_1 - k_{12} M_{12}) \frac{di_1}{dt} - k_{12} M_{12} \frac{di_0}{dt} = i_1 r_1; \quad (8,20)$$

$$u_2 = -(L_2 - k_{21} M_{21}) \frac{di_2}{dt} - M_{21} \frac{di_0}{dt} - i_2 r_2. \quad (8,21)$$

მიღებულ განტოლებებს აქვთ გარკვეული ფიზიკური აზრი. ისინი გვიჩვენებენ, რომ ტრანსფორმატორის თვითეულ გრაგნილში თითქოს მოქმედებს ორი ე. შ. ძ. ერთი მათგანი აღიძვრება ტრანსფორმატორის i_0 დამაგნიტების დენის პროპორციულ ნაკადშემშით, ამასთან ე. შ. ძ. პირველად გრაგნილში ტოლია:

$$e_{01} = -k_{12} M_{12} \frac{di_0}{dt}, \quad (8,22)$$

მეორად გრაგნილში კი:

$$e_{02} = -M_{21} \frac{di_0}{dt}, \quad (8,23)$$

და რადკანაც $M_{12} = M_{21}$,

$$e_{01} : e_{02} = k_{12}. \quad (8,24)$$

მაგნიტურ ნაკადს, რომელიც პირველად გრაგნილთან ქმნის $k_{12}M_{12}i_0$ — ნაკადშებმას, ხოლო მეორად გრაგნილთან $M_{21}i_1$, ნაკადშებმას, უწოდებენ მთავარ ან საერთო მაგნიტურ ნაკადს. როდესაც გვაქვს ფოლადის გულანა, ანგარიშის გასაადვილებლად ჩვეულებრივად სთვლიან, რომ მთავარი მაგნიტური ნაკადის ინდუქციური ხაზები მთლიანად გადის ფოლადის გულანაში და შებმულია პირველადი და მეორადი გრაგნილების ყველა ხვევებთან.

მეორე ე. მ. ძ. აღიძვრება გრაგნილებში. მოცემულ გრაგნილის დენის პროპორციულ ნაკადშებმით.

ასე, მაგალითად. პირველად გრაგნილისათვის ეს ნაკადშებმა ტოლია:

$$(L_1 - k_{12}M_{12})i_1 = L_1i_1 - k_{12}M_{12}i_1. \quad (8,25)$$

როგორც (8,25)-დან სჩანს ის წარმოადგენს სხვაობას პირველად გრაგნილთან L_1i_1 ნაკადშებმასა, იმ შემთხვევაში, როდესაც ამ გრაგნილში გადის დენი i_1 და პირველად გრაგნილთან $k_{12}M_{12}i_1$ ნაკადშებმას შორის, იმ შემთხვევაში i_1 დენი რომ გადიოდეს მეორად გრაგნილში და ქმნიდეს იგივე დანა-მაგნიტებელ ძალას¹. ამრიგად $L_1 - k_{12}M_{12}$ სხვაობა ერთგვარად ახასიათებს გრაგნილების მაგნიტური კავშირის ხარისხს. რომ ორივე გრაგნილი სივრცეში თანხედენილი ყოფილიყო ეს სხვაობა ტოლი იქნებოდა ნულის.

ნაკადშებმათა სხვაობას $(L_1 - k_{12}M_{12})i_1 = \Psi_{21}$, ამიტომ უწოდებენ პირველადი გრაგნილის ფანტეის ნაკადშებმას, ხოლო სხვაობას $(L_2 - k_{21}M_{21})i_2 = \Psi_{12}$ — მეორადი გრაგნილის ფანტეის ნაკადშებმას.

ფანტეის ველი შეიძლება შეიქმნას მთავარი ველისაგან დამოუკიდებლად, თუ პირველად და მეორად გრაგნილებში გავატარებთ i_1 და i_2 დენებს, რომლებიც აკმაყოფილებენ პირობას:

$$i_1w_1 = -i_2w_2. \quad (8,26)$$

ფანტეის ველის ინდუქციური ხაზები შებმულია ნაწილობრივ მხოლოდ პირველადი გრაგნილის ხვევებთან და ნაწილობრივ მხოლოდ მეორადი გრაგნილის ხვევებთან. ცალკეული ხაზები ზოგჯერ შეიძლება აგრეთვე შებმული იყოს ორივე გრაგნილის ხვევების ნაწილთან. ამ ნაკადშებმებს უწოდებენ ორმაგ მაგნიტურ ფანტეას.

როგორც ნახ. 72-დან ჩანს ფანტეის ველის ინდუქციური ხაზები იკვრება უმთავრესად ფოლადის გულანას გარეშე, და მხოლოდ ნაწილობრივ გადის მასში. ფანტეის ველის არცერთი ინდუქციური ხაზი არ არის შებმული ორივე გრაგნილის ყველა ხვევებთან.

ვინაიდან თანახმად (8,14)-ისა $i_1w_1 = i_2w_2$, ამიტომ ტრანსფორმატორის რეზულტიური მაგნიტური ველი შეიძლება განხილულ იქნას, როგორც ორი ველის ჯამი:

¹. რადგან $w_1 \leq w_2$, ამიტომ მეორად გრაგნილში i_2 დენის გატარებისას აუცილებელია შეიცვალოს იგი ხვევათა რიცხვის უკუპროპორციულად, ან პირობითი ჩვეთვალთ, რომ $w_2 = w_1$.

1. პირველადი გრაგნილის $i_0 w_1$ დამამაგნიტებელი ძალის მიერ შექმნილ არესა.

2. ერთდროულად მოქმედ პირველადი გრაგნილის $-i_2 w_2$ დამამაგნიტებელი ძალის და მეორადი გრაგნილის $+i_2 w_2$ დამამაგნიტებელი ძალის მიერ შექმნილ ფანტვის არესა.

ტრანსფორმატორის მაგნიტურ არეს დაშლა ორ არედ მოსახერხებელია აკრთავე მისი ანალიზისათვის, ვინაიდან თვითფული ველის ინდუქციური ხაზების კონფიგურაცია პერიოდის განმავლობაში რჩება უცვლელი (ნახ. 72, ა და ბ), მაშინ, როდესაც რენულტიური არეს ინდუქციური ხაზები პერიოდის განმავლობაში განუწყვეტლივ იცვლის თავის ფორმას.

ტრანსფორმატორის ძაბვისა და დენის სინუსოიდურად ცვალებადობის შემთხვევაში (8,20) და (8,21) განტოლებები შეიძლება დაწერილ იქნეს შემდეგი სახით:

$$\dot{U}_1 - j\omega(L_1 - k_{12}M_{12})\dot{I}_1 - j\omega k_{12}M_{12}\dot{I}_2 = \dot{I}_1 r_1; \quad (8,27)$$

$$\dot{U}_2 = -j\omega(L_2 - k_{21}M_{21})\dot{I}_2 - j\omega M_{21}\dot{I}_1 - \dot{I}_2 r_2. \quad (8,28)$$

ე. მ. ძ-ბი:

$$-j\omega(L_1 - k_{11}M_{12})\dot{I}_1 = \dot{E}_{e1}, \quad (8,29)$$

$$-j\omega(L_2 - k_{21}M_{21})\dot{I}_2 = \dot{E}_{e2}, \quad (8,30)$$

უწოდებენ პირველადი და მეორადი გრაგნილების ფანტვის ე. მ. ძ-ებს. აღნიშნავთ რა $\omega(L_1 - k_{12}M_{12}) - x_1$ -თ, $\omega(L_2 - k_{21}M_{21}) - x_2$ -თ, და $\omega k_{12}M_{12}$ -ს x_{12} -თი, განტოლებები (8,27) და (8,28) შეგვიძლია დავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\dot{U}_1 = jI_0 x_{12} + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_{e1} + \dot{I}_1 Z_1, \quad (8,31)$$

$$\dot{U}_2 = -jk_{21}I_0 x_{12} - \dot{I}_2(r_2 + jx_2) = \dot{E}_{e2} - \dot{I}_2 Z_2, \quad (8,32)$$

სადაც Z_1 და Z_2 პირველადი და მეორადი გრაგნილების სრული წინააღმდეგობებია, ხოლო E_{e1} და E_{e2} —იგივე გრაგნილებში ურთიერთინდუქციის ნაკადუმების მიერ დაინდუქტირებული ე. მ. ძ-ბია.

გ) ტრანსფორმატორის განტოლებები გულანაში დანაკარგების აღრიცხვით. (8,31) და (8,32) განტოლებების გამოყენებისას ჩვენ ვთვლით რომ დამამაგნიტების პროცესი არ არის დაკავშირებული ენერჯიის დაკარგვასთან. ეს დაწვება სამართლიანია მხოლოდ საპაერო ტრანსფორმატორების მიზართ. მაშინ კი, როდესაც გვაქვს ფოლადის გულანა, ცვლადი მაგნიტური ნაკადი იწვევს დანაკარგებს, რომლებიც დაკავშირებულია ფოლადის ფურცლებში გრიგალისებურ დენებთან და ჰისტერეზისის მოვლენასთან. უქანასკნელ შემთხვევაში I_0 —დენში ჩნდება დანაკარგებით გაპირობებული აქტიური მდგენელი I_a . I_0 დენისათვის ვლებულობთ:

$$I_a = \sqrt{I_e^2 + I_r^2}, \quad (8,33)$$

სადაც I_r , I_e დენის, დამამაგნიტებელი (რეაქტიული) მდგენელია. ამ შემთხვე-

ვაში I_0 დენი არ იძყოფება კვადრატურაში E_{01} და F_{02} , ე. მ. ძალებთან, და უსწრებს მათ რაღაც $\frac{\pi}{2}$ -ზე კუთხით, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 78-ზე

მოცემულ დენების დიაგრამაზე.

ფოლადის გულანას შემთხვევაში, I_0 დამამაგნიტებელი დენი ტრანსფორმატორის ფოლადის არასწორხაზოვანი მაგნიტური თვისებების გამო—არასინუსოიდურია. ტრანსფორმატორის ჭეშაობის ანალიზის გაადვილების მიზნით i_0 დენის ეფექტურ მნიშვნელობას პირობით სცვლიან ტოლი ექვივალენტური სინუსოიდური დენის I_0 ეფექტური მნიშვნელობით.

თუ r_{12} -ით აღენიშნავთ გულანაში დინაქარგებით გაპირობებულ ექვივალენტურ წინააღმდეგობას, მაშინ ჩავთვლით რა, როგორც წინათ, რომ მთავარ მაგნიტურ ნაკადსა და დამამაგნიტების დენს შორის გარკვეულ ზღვრებში—რჩება სწორხაზოვანი დამოკიდებულება, ნახ. 73-ს საფუძველზე შეგვიძლია დავწეროთ, პირველად გრაფიკში მთავარი მაგნიტური ნაკადის მიერ დაინდუქტირებულ ე. მ. ძ.-თვის შემდეგი გამოსახულება:

$$\dot{E}_{01} = \dot{E}_{02} k_{12} = -\dot{I}_0 (r_{12} + jx_{12}) = -\dot{I}_0 Z_{12}. \quad (8,34)$$

მაშინ (8,31) და (8,32) განტოლებები დაიწერება შემდეგი სახით:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 Z_{12} + \dot{I}_1 Z_1; \quad (8,35)$$

$$\dot{U}_2 = -k_{21} \dot{I}_0 Z_{12} - \dot{I}_2 Z_2. \quad (8,36)$$

r_{12} —წინააღმდეგობა განისაზღვრება გამოსახულებიდან:

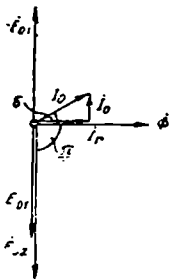
$$P_{12} = I_0^2 r_{12}, \quad (8,37)$$

სადაც P_{12} —ტრანსფორმატორის მიერ დამამაგნიტების პროცესში შთანთქმული ერთი ფაზის შესაბამისი აქტიური სიმძლავრეა.

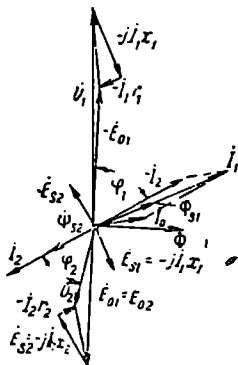
ღ) ტრანსფორმატორის ვექტორული დიაგრამა. (8,35) და (8,36) განტოლებით გამოსახული თანაფარდობანი შეიძლება ილუსტრირებულ იქნას გრაფიკულად ვექტორული დიაგრამების საშუალებით. ნახ. 74-ზე მოცემულ დიაგრამაზე Φ მთავარი მაგნიტური ნაკადი, რომელიც ჩამორჩენილია \dot{I}_0 დენისაგან $\frac{\pi}{2}$ კუთხით, აინდუქტირებს, პირველად გრაფიკში \dot{E}_{01} , ე. მ. ძ.-ს, და მეორედ გრაფიკში \dot{E}_{02} , ე. მ. ძ.-ს.

თუ ვექტორული დიაგრამის ყველა ვექტორების ერთ მასშტაბში მოხერხებული აგებისათვის დავუშვებთ, რომ $w_1 = w_2$, მაშინ $\dot{E}_{01} = \dot{E}_{02}$. მეორედ გრაფიკში \dot{I}_2 დენის არსებობისას, რომლის ძერა \dot{E}_{02} ვექტორის მიმართ დამოკიდებულია დატვირთვის ხასიათზე (ნახ. 74 შეესაბამება შერეულ ინდუქტიურ დატვირთვას), შეიქმნება \dot{U}'_2 ფანტვის ნაკადშებმა, რომელიც ფაზით თანხედენილია \dot{I}_2 დენთან და მეორედ გრაფიკში აინდუქტირებს $\dot{E}_{23} = -j\dot{I}_2 x_2$, ე. მ. ძ.-ს. \dot{I}_2 —დენთან ფაზაში იმყოფება $\dot{I}_2 x_2$ ძაბვის ვარდ-

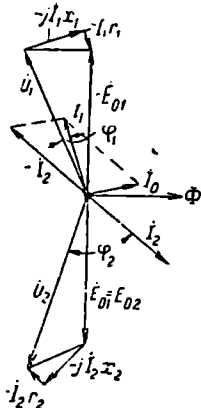
ნა. მეორადი ძაბვის \dot{U}_2 ვექტორი ტოლია $\dot{E}_{02} + \dot{E}_{s2} - \dot{I}_2 r_2$. \dot{I}_1 პირველად დენთან, რომელიც წარმოადგენს \dot{I}_0 და \dot{I}'_2 დენების გეომეტრიულ სხვაობას, ფაზაში იმყოფება ψ_{s1} პირველადი გრაგნილის ფანტიის ნაკადში. პირველადი ძაბვა \dot{U}_1 აწონასწორებს \dot{E}_{01} და $\dot{E}_{s1} = -jI_1 x_1$ ე. მ. ძებს და აკომპენსირებს $\dot{I}_1 r_1$ ძაბვის ვარდნას. ნახ. 75-ზე აგებულია ვექტორული დიაგრამა შერეული



ნახ. 73.



ნახ. 74. დატვირთული ტრანსფორმატორის ვექტორული დიაგრამა.



ნახ. 75.

ტევადური დატვირთვის შემთხვევისათვის. ამ დიაგრამის დამახასიათებელ განსაკუთრებულობას წარმოადგენს ის, რომ ფანტიის ე. მ. ძები კი არ ასუსტებს, არამედ აღიღებს მთავარი ნაკადით აღძრულ ე. მ. ძებს.

იმისათვის, რომ $\omega_1 \neq \omega_2$ შემთხვევისათვის, გვექონდეს პირველადი და მეორადი სიდიდეების, შეთავსებული ვექტორული დიაგრამების აგების შესაძლებლობა, საჭიროა ამ სიდიდეების მასშტაბები აღებულ იქნეს ისეთნაირად, რომ მათი გრაფიკული გამოსახვა იყოს თანზომადი. ამ გართულების თავიდან აცილებისათვის ჩვეულებრივად ვექტორული დიაგრამების აგებისას მეორადი სიდიდეები მიჰყავთ პირველადი გრაგნილის ხვევთა რიცხვთან და შეთავსებულ ვექტორულ დიაგრამებზე გადასდებენ არა ნამდვილ, არამედ მიყვანილ მეორად სიდიდეებს.

თუ ნამდვილი მეორადი ძაბვა არის \dot{U}_2 , მაშინ მეორადი მიყვანილი ძაბვა ტოლია

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_2 \frac{\omega_1}{\omega_2} = \dot{U}_2 k_{12}. \quad (8,38)$$

მეორადი მიყვანილი დენი ტოლია:

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = \dot{I}_2 k_{21}, \quad (8,39)$$

$$\dot{U}_2 \dot{I}_2 = \dot{U}_2' \dot{I}_2'$$

ტოლობებიდან: $I_2^2 r_1 = I_2'^2 r_1'$ და $r_2 : x_2 = r_2' : x_2'$ ეპოულობთ, რომ მეორადი მიყვანილი წინააღმდეგობანი ტოლია

$$r_2' = r_2 k_{12}^2; \quad x_2' = x_2 k_{12}^2; \quad Z_2' = Z_2 k_{12}^2. \quad (8,40)$$

ტრანსფორმატორის მეორადი წრედის პარამეტრების მიყვანა პირველადი გრაგნილის ხვევთა რიცხვთან ადვილდება არა მარტო ვექტორული დიაგრამების აგებას, არამედ ტრანსფორმატორის მუშაობის საერთო ანალიზსაც, როგორც ნახვევები იქნება ქვემოთ.

ე) ტრანსფორმატორის შენაცვლების სქემა. (8,35) და (8,36) გამოსახულების საშუალებებით, შეიძლება მივიღოთ ტრანსფორმატორის შენაცვლების ძალიან მარტივი სქემა. დავუშვათ $k_{21} = 1$ და \dot{U}_2 შევცვალოთ $\dot{I}_2 Z$, სადაც Z — გარე წრედის სრული წინააღმდეგობაა. მაშინ, მივიღებთ რა მხედველობაში (8,18) ტოლობას, შეგვიძლია (8,36) განტოლება გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$(\dot{I}_0 - \dot{I}_1) Z = -\dot{I}_0 Z_{12} + (\dot{I}_1 - \dot{I}_0) Z_2, \quad (8,41)$$

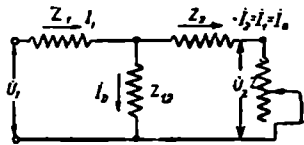
საიდანაც

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 \frac{Z + Z_2}{Z + Z_{12} + Z_2}. \quad (8,42)$$

თუ (8,42)-დან (8,35)-ში ჩავსვამთ \dot{I}_0 -ს მნიშვნელობას მივიღებთ:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \left[Z_1 + \frac{(Z + Z_2) \cdot Z_{12}}{Z + Z_2 + Z_{12}} \right]. \quad (8,43)$$

განტოლება (8,43) გვიჩვენებს, რომ ტრანსფორმატორისათვის არსებობს შენაცვლების სქემა შემდეგი სახით: Z_1 წინააღმდეგობა მიმდევრობითაა ჩართული პარალელურად შეერთებულ ორ $Z + Z_2$ და Z_{12} წინააღმდეგობებთან. შესაბამისი სქემა მოყვანილია ნახ. 76-ზე. ამ სქემაში Z წინააღმდეგობა ცვალებადია, რადგან იგი დამოკიდებულია დატვირთვის პირობებზე.



ნახ. 76.

შენაცვლების სქემის აგების დროს $w_1 \neq w_2$ შემთხვევისათვის, მეორადი წრედის წინააღმდეგობები უნდა იქნას მიყვანილი პირველადი გრაგნილის ხვევთა რიცხვთან და სათანადოდ $Z_2, -\dot{U}_2, -\dot{I}_2$ სიდიდეების ნაცვლად შენაცვლების სქემაში უნდა იქნეს აღებული $Z_2', -\dot{U}_2'$ და $-\dot{I}_2'$.

შენაცვლების სქემის დახმარებით საკმარისი სიზუსტით შეიძლება გამოკვლევად იქნეს ტრანსფორმატორის მუშა თვისებები. ეს თვისებები უპირველეს ყოვლისა დამოკიდებულია ტრანსფორმატორის მუდმივებზე Z_{12}, Z_1 და Z_2 , ამიტომ ტრანსფორმატორის მუდმივების განსაზღვრას დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს.

ვ) უქმი სვლის ცდა. Z_{12} წინააღმდეგობა და მისი მდგენელები r_{12} და x_{12} ექსპერიმენტალური გზით შეიძლება განისაზღვროს უქმი სვლის ცდიდან. უქმი სვლის ცდის დროს პირველადი გრაგნილი მიერთებულია ნომინალური სიხშირის ე. ი. ტრანსფორმატორის დაფაზე ნაწვენებ სიხშირის ცველადი დენის წყაროსთან. მოყვანილ პირველად ძაბვას ამ დროს უნდა ქონდეს ნომინალური მნიშვნელობა.

უქმი სვლის ცდის დროს მეორადი გრაგნილი რჩება გათიშული. მის მოწყობებზე მოქმედი ხაზური ძაბვა აღინიშნება დაფაზე, როგორც მეორადი ნომინალური ძაბვა.

ტრანსფორმატორის უქმი სვლის შემთხვევაში (8,35) და (8,36) განტოლებებში უნდა დავუშვათ

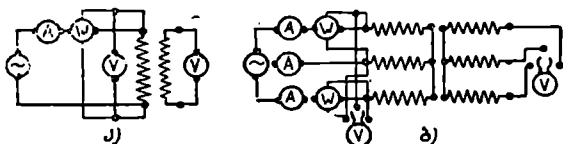
$$\dot{I}_3 = 0 \quad \text{და} \quad I_1 = I_{10} = I_0^1.$$

მაშინ

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0(Z_{11} + Z_1); \quad (8,44)$$

$$\dot{U}_2 = -k_{21} \dot{I}_0 Z_{12}. \quad (8,45)$$

უქმი სვლის ცდის დროს გაიზომება ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილთან მოყვანილი ძაბვა, პირველად გრაგნილში გამავალი დენი და



ნახ. 77. უქმი სვლის ცდის სქემები. ა—ერთფაზა, და ბ—სამფაზა ტრანსფორმატორის.

ტრანსფორმატორის მიერ შთანქმული აქტიური სიმძლავრე, რომელიც მთლიანად იხარჯება უქმი სვლის დანაკარგების დაფარვაზე. გარდა ამისა ზომიან ტრანსფორმატორის მეორად ძაბვას, ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის განსაზღვრავად. ტრანსფორმატორის უქმი სვლის ცდის სქემები გამოსახულია ნახ. 77-ზე.

გაზომილი სიდიდეების მიხედვით გამოვთვლით:

$$\dot{x}_0 = |Z_{12} + Z_1| = \frac{U_1}{I_0}; \quad (8,46)$$

$$r_0 = r_{12} + r_1 = \frac{P_0}{P_{10}}; \quad (8,47)$$

$$x_0 = x_{12} + x_1 = \sqrt{\dot{x}_0^2 - r_0^2}; \quad (8,48)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_{10}}. \quad (8,49)$$

¹ უქმი სვლის დენი I_0^1 განსხვავდება $I_0 = I_1 + I_2 k_{21}$ —დენისაგან, რომელიც გვაქვს დარტირთვის დროს, თუ კი მათ შევადარებთ ტრანსფორმატორის ერთნაირი პირველადი ძაბვების შემთხვევაში, ვინაიდან ორივე შემთხვევაში ინდუქციები გულანაში განსხვავებულია.

ტრანსფორმატორის მუდმივები ეკუთვნის ერთ ფაზას. ამიტომ სამფაზა ტრანსფორმატორის შემთხვევაში მათი გამოთვლის დროს უნდა ვისარგებლოთ დენის, ძაბვის და სიმძლავრის ფაზური მნიშვნელობებით. სამფაზა ტრანსფორმატორის შემთხვევაში მხედველობაში უნდა ვიქონიოთ, აგრეთვე, რომ მაგნიტური სისტემის არასიმეტრიულობის გამო უქმი სვლის დენი სხვადასხვა ფაზებში არაერთნაირი იქნება, სახელდობრ: შუა ფაზაში, რომლისთვისაც გულანას შეკრული კონტურის მაგნიტური წინააღმდეგობა უფრო მცირეა, ვიდრე განაპირა ფაზებისათვის, დენი I_{10} იქნება აგრეთვე უფრო მცირე, ვიდრე ორ დანარჩენ ფაზაში, ამიტომ უქმი სვლის ცდიდან განსაზღვრულ მუდმივების გამოთვლისას, I_{10} —დენი უნდა ავიღოთ, სამივე ფაზისათვის გაზომილი დენების საშუალო მნიშვნელობის ტოლი.

სამფაზა ტრანსფორმატორისათვის ფაზური და ხაზური ძაბვების ტრანსფორმაციის კოეფიციენტები დაკავშირებულია გარკვეული თანაფარდობით, რომელიც დამოკიდებულია გრაგნილების შეერთების სქემისაგან. უქმი სვლის ცდის დროს სამფაზა სისტემის სიმეტრიის კონტროლის მიზნით რეკომენდებულია ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის გაზომვა, როგორც ფაზური, ისე ხაზური ძაბვებისათვის.

უქმი სვლის ცდა საშუალებას გვაძლევს აგრეთვე განვსაზღვროთ I_{10} დენის აქტიური და რეაქტიული მდგენელები:

$$I_a = I_{10} \cos \varphi_0; \quad I_r = I_{10} \sin \varphi_0.$$

გარდა ამისა, შეიძლება ცალკე გაზომილ იქნეს პირველადი გრაგნილის წინააღმდეგობა, თუ კი მასში გაეატარებთ მუდმივ დენს. ეს წინააღმდეგობა რამდენადმე ნაკლები იქნება. ვიდრე პირველადი გრაგნილის r_1 —აქტიური წინააღმდეგობა, ვინაიდან იგი არ აღრიცხავს გრიგალური დენებით გამტარებში გამოწვეულ დამატებით დანაკარგებს, რომლებიც წარმოიშევიან გრაგნილში ცვლადი დენის გავლისას, მაგრამ ეს არასიზუსტე მცირე გავლენას ახდენს საბოლოო რეზულტატებზე, ცნობილია რა r_1 -ის მიახლოებითი მნიშვნელობა შესაძლებელია განისაზღვროს უქმი სვლის დროს პირველად გრაგნილში ძაბვის ვარდნა $I_{10} r_1$.

ვიციოთ რა წინააღმდეგობა r_1 , შეიძლება მოგვეხდინა დანაკარგების დაყოფა, დანაკარგებად გულანაში და დანაკარგებად გრაგნილში უქმი სვლის დროს. მაგრამ ამის აუცილებლობა არ არის, ვინაიდან $r_1 \ll r_{12}$ და უქმი სვლის დანაკარგები შეიძლება მთლიანად მივაკუთვნოთ მაგნიტურ სისტემას.

არ არის აგრეთვე აუცილებელი x_{12} და x_1 ინდუქტიური წინააღმდეგობების განცალკევება, ვინაიდან $x_1 \ll x_{12}$ და უქმი სვლის დროს რეაქტიული ძაბვის ვარდნა შეიძლება უგულებელვყოთ.

უნდა აღინიშნოს, რომ უქმი სვლის ცდის რეზულტატებზე არსებითი გავლენა აქვს მოდებული ძაბვის მრუდის ფორმას. ამიტომ არაზუსტი რეზულტატების თავიდან აცილების მიზნით მოდებული ძაბვის მრუდის ფორმა უნდა შემოწმდეს ოსცილოგრაფის საშუალებით¹.

¹ უქმი სვლის ცდის მონაცემები სინუსოიდურ ძაბვასთან მიყვანის მეთოდების შესახებ იხ. ტრანსფორმატორების გამოცდის OCT „Електроустство“ № 2, 1940.

ზ) მოკლედ შერთვის ცდა. მოკლედ შერთვის ცდის დროს ექსპერიმენტული გზით განისაზღვრება სიდიდე $Z_1 + Z_2'$. Z_1 და Z_2' მუდმივების ცალკე განსაზღვრა წარმოადგენს დიდ ექსპერიმენტულ სიძნელეს, მაგრამ არც არის ამის პრაქტიკული აუცილებლობა. როგორც შემდეგში დავინახავთ პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს ჯამს $Z_1 + Z_2'$.

მოკლედ შერთვის ცდის დროს მეორადი გრაგნილი ჩაირთვება მოკლედ, პირველად გრაგნილთან კი მოიყვანება ისეთი ძაბვა, რომ გრაგნილებში დენს ქონდეს ნომინალური მნიშვნელობა. ამ ძაბვას მოკლედ შერთვის ძაბვა ეწოდება.

ტრანსფორმატორის მოკლედ შერთვის დროს, ნახ. 76-ზე ნაჩვენები შენაცვლების სქემა, რომელიც აგებულია $w_1 = w_2$ შემთხვევისათვის გარდაიქმნება ნახ. 78-ზე ნაჩვენებ სქემად. ვინაიდან $U_2 = 0$, მოდებული U_1 ძაბვა უნდა აწონასწორებდეს მხოლოდ ძაბვის ვარდნას თვითონ ტრანსფორმატორში. ტრანსფორმატორი შინაგანი წინააღმდეგობა შედარებით მცირეა. ამიტომ მოდებული ძაბვა $U_1 = U_2$ უნდა იყოს მცირე. ჩვეულებრივად იგი იმყოფება ზღვრებში $-5 \div -15\%$ ნომინალური ძაბვისაგან. დამაგნიტების დენი ამ დროს ხდება ძალზე მცირე და იგი შედარებით I_1 და I_2 დენებთან შეიძლება უგულვებელყოთ.

მოკლედ შერთვის დროს დაეუშვებთ რა (8,43) განტოლებაში $Z = 0$ მივიღებთ:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{I}_1 \left(Z_1 + \frac{Z_2 Z_{12}}{Z_2 + Z_{12}} \right). \quad (8,50)$$

ვინაიდან ჩვეულებრივ

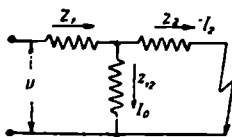
$$Z_{12} \gg Z_2,$$

დიდი სიზუსტით შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_1 (Z_1 + Z_2) = \dot{I}_1 Z_k. \quad (8,51)$$

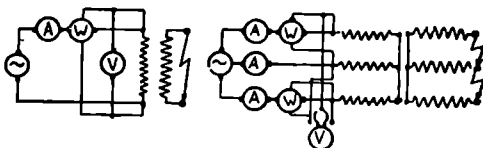
Z_k წინააღმდეგობას მოკლედ შერთვის წინააღმდეგობა ეწოდება.

(8,51)-ის შესაბამისად მივიღებთ: $r_k \approx r_1 + r_2$, $x_k \approx x_1 + x_2$.



ა)

ნახ. 78.



ბ)

ნახ. 79. მოკლედ შერთვის ცდის სქემები ა—ერთფაზა ტრანსფორმატორის; ბ—სამფაზა ტრანსფორმატორის.

მეორე ნაწილის § 8,ბ დან გამომდინარეობს, რომ

$$x_k \approx \omega[(L_1 - M_{12}) + (L_2 - M_{21})] = \omega(L_1 + L_2 - 2M_{12}).$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც $\omega_1 \neq \omega_2$, Z_2 -ის ნაცვლად აღებულ უნდა იქნეს მისი მოყვანილი მნიშვნელობა Z_2' . ამ შემთხვევაში:

$$Z_k \approx Z_1 + Z_2' = Z_1 + Z_2 k_{12}^2. \quad (8,52)$$

მოკლედ შერთვის ცდის დროს გაიზომება პირველად გრაგნილთან მოყვანილი ძაბვა $U_1 = U_k$, I_k^1 დენი და ტრანსფორმატორის მიერ ხმარებულ სიმძლავრე P_k .

მოკლედ შერთვის ცდის სქემები ნაჩვენებია ნახ. 79-ზე. მოკლედ შერთვის ცდის მონაცემების მიხედვით განისაზღვრება:

$$z_k = \frac{U_k}{I_k^1} \approx |Z_1 + Z_2'|; \quad (8,53)$$

$$r_k = \frac{P_k}{I_k^1{}^2} \approx r_1 + r_2'; \quad (8,54)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \approx x_1 + x_2'; \quad (8,55)$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k I_k^1}. \quad (8,56)$$

მიღებული მონაცემების მიხედვით შეიძლება აგრეთვე გამოთვლილ იქნეს მოკლედ შერთვის ძაბვის აქტიური და რეაქტიული მდგენელები:

$$U_a = I_1 r_k, \quad U_r = I_1 x_k.$$

მოკლედ შერთვის ცდის მონაცემების მიხედვით შეიძლება აგებულ იქნეს მოკლედ შერთვის გამარტივებული ვექტორული დიაგრამა. ასეთი დიაგრამა $I_1 = I_H$ შემთხვევისათვის ნაჩვენებია ნახ. 80-ზე. სამკუთხედ ABC -ს ეწოდება მოკლედ შერთვის სამკუთხედი.

მოკლედ შერთვის სრული დიაგრამა შეიძლება მიღებულ იქნეს ნახ. 74-ზე ნაჩვენებ დიაგრამიდან, თუ დავუშვებთ რომ მასში $U_2 = 0$ და $I_0 = 0$. ასეთი დიაგრამა გამოსახულია ნახ. 81-ზე.

მოკლედ შერთვის ძაბვა და მისი მდგენელები ჩვეულებრივად გამოისახება არა ვოლტებში, არამედ პროცენტებში ნომინალურ ძაბვისაგან:

$$e_k = \frac{U_k}{U_H} \cdot 100 = \frac{I_H z_k}{U_H} \cdot 100\%;$$

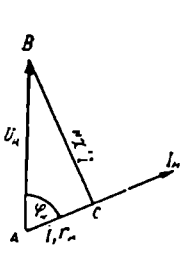
$$e_a = e_k \cos \varphi_k = \frac{I_H r_k}{U_H} \cdot 100\%; \quad (8,57)$$

$$e_r = e_k \sin \varphi_k = \frac{I_H x_k}{U_H} \cdot 100\%.$$

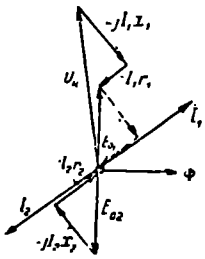
¹ ზოგიერთ შემთხვევაში მოკლედ შერთვის ცდის დროს უფრო მოსახერხებელია ძაბვის მიყვანა მეორად გრაგნილთან, და პირველადის ჩაყვანა მოკლედ.

ტრანსფორმატორის გრაგნილების აქტიური წინააღმდეგობები მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული გრაგნილების ტემპერატურისაგან. მიღებულია რომ ცდის დროს გაზომილი აქტიური წინააღმდეგობა r_x მიყვანილ იქნეს გრაგნილების პირობით ტემპერატურასთან 75°C .

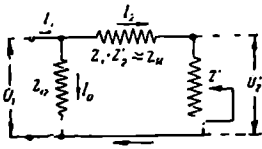
თ. მეორადი ძაბვის პროცენტული ცვლილება. ტრანსფორმატორების პრაქტიკული გამოყვლევების დროს საკმარის სიზუსტეს იძლევა ნახ. 82-ზე მოცემული გამარტივებული შენაცვლების სქემა. ახგარიშის გაადვილებისათვის



ნახ. 80.



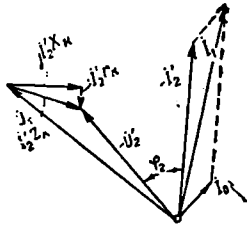
ნახ. 81.



ნახ. 82.

ამ სქემაში Z_2 წინააღმდეგობა გამოტანილია უშუალოდ პირველად მომქირებზე¹ შენაცვლების ამ სქემის შესაბამისი, ტრანსფორმატორის გამარტივებული ვექტორული დიაგრამა მოყვანილია ნახ. 83-ზე.

ვექტორი $\dot{I}_2' Z_K = \dot{U}_K$ წარმოადგენს რა \dot{U}_1 და $-\dot{U}_2'$ ვექტორების ჩამკეტს (ნახ. 83), ახასიათებს მეორადი ძაბვის ცვლილებას უქმი სვლიდან დატვირთვაზე გადასვლისას, როდესაც $U_1 = \text{const}$. მეორადი ძაბვის ცვლილება ჩვეულებრივად გამოისახება პროცენტებში ნომინალურ ძაბვისაგან. მეორადი ძაბვის პროცენტულ ცვლილებაში იგულისხმება შემდეგი გამოსახვა.



ნახ. 83.

$$\Delta U_2\% = \frac{U_{2M} - U_2}{U_{2M}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{U_2}{U_{2M}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{U_2'}{U_{1M}}\right) \cdot 100, \quad (8.58)$$

სადაც U_{1M} და U_{2M} —პირველადი და მეორადი ნომინალური ძაბვებია (ე. ი. ძაბვები უქმი სვლის დროს), და U_2 —ძაბვა მოცემული დატვირთვის დროს.

ნახ. 84-ზე მოცემული დიაგრამიდან, მივიღებთ რა მხედველობაში, რომ $I_1 \approx I_2'$, ეპოულობთ

¹ შენაცვლების სქემის ასეთი გარდაქმნის უფრო სრული დასაბუთება მოცემულია IV ნაწილის § 34-ში.

$$\begin{aligned}
 U_2' &= \sqrt{U_1'^2 - (I_2' x_K \cos \varphi_2 - I_2' r_K \sin \varphi_2)^2} - (I_2' r_K \cos \varphi_2 + I_2' x_K \sin \varphi_2) = \\
 &= U_1 \left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{I_2' x_K}{U_1} \cos \varphi_2 - \frac{I_2' r_K}{U_1} \sin \varphi_2 \right)^2} - \right. \\
 &\quad \left. - \left(\frac{I_2' r_K}{U_1} \cos \varphi_2 + \frac{I_2' x_K}{U_1} \sin \varphi_2 \right) \right\}. \quad (8,59)
 \end{aligned}$$

ვინაიდან ამ გამოთქმაში რადიკალის ნიშნის ქვეშ ფრჩხილებში მდგომი წევრი ერთზე გაცილებით მცირეა, შეგვიძლია ვისარგებლოთ ასეთ შემთხვევაში სამართლიანი მიახლოებითი თანაფარდობით $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{x}{2}$, რის შედეგად მივიღებთ:

$$\begin{aligned}
 U_2' &\approx U_1 \left\{ 1 - \left(\frac{I_2' r_K}{U_1} \cos \varphi_2 + \frac{I_2' r_K}{U_1} \sin \varphi_2 \right) - \frac{\left(\frac{I_2' x_K}{U_1} \cos \varphi_2 - \frac{I_2' r_K}{U_1} \sin \varphi_2 \right)^2}{2} \right\} \\
 \Delta U'_{\%} &= \left(1 - \frac{U_2'}{U_1} \right) 100 = \left\{ \left(\frac{I_2' r_K}{U_{1\kappa}} \cos \varphi_2 + \frac{I_2' x_K}{U_{1\kappa}} \sin \varphi_2 \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\left(\frac{I_2' x_K}{U_{1\kappa}} \cos \varphi_2 - \frac{I_2' r_K}{U_{1\kappa}} \sin \varphi_2 \right)^2}{2} \right\} 100. \quad (8,60)
 \end{aligned}$$

გამოიყენებთ რა ამ განოსახებაში (8,57) განტოლების თანაფარდობებს და აღენიშნავთ, რომ $\frac{I_2'}{I_2' \kappa} = \beta$, მივიღებთ:

$$\Delta U'_{\%} = \beta (\epsilon_a \cos \varphi_2 + \epsilon_r \sin \varphi_2) + \beta^2 \frac{(\epsilon_r \cos \varphi_2 - \epsilon_a \sin \varphi_2)^2}{200}. \quad (8,61)$$

უმრავლეს შემთხვევებში (8,61) განოსახერს მეორე წევრი შეიძლება უგულვებელვყოთ და მიახლოებით მივიღოთ:

$$\Delta U'_{\%} \approx (\epsilon_a \cos \varphi_2 + \epsilon_r \sin \varphi_2) \beta. \quad (8,62)$$

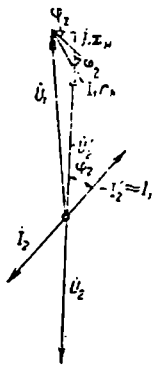
ნახ. 85-ზე ნაჩვენებია დამოკიდებულება $\Delta U'_{\%} = f(\cos \varphi_2)$, უცვლელი β დატვირთვის დროს. როგორც ნახ. 85, გვიჩვენებს ტვეადური დატვირთვის დროს ძაბვის ცვლილება რაღაც მომენტიდან ხდება უარყოფითი, ე. ი. ადგილი აქვს არა ძაბვის ვარდნას, არამედ აწევას. ინდუქტიური დატვირთვის დროს უდიდესი ძაბვის ვარდნას $\Delta U_{max} = \beta \epsilon_a$ ადგილი აქვს მაშინ, როდესაც $\varphi_2 = \varphi_{\kappa}$, რაც უშუალოდ გამომდინარეობს ნახ. 84-ზე მოცემულ ვექტორული დიაგრამიდან.

ნახ. 86 ზე ნაჩვენებია დამოკიდებულება $\Delta U'_{\%} = f(\beta)$, როდესაც $\cos \varphi_2 = \text{const}$. რადგან (8,61) განტოლების უკანასკნელი წევრი ძალზე სუსტ გავ-

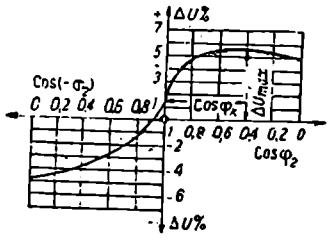
ლენას ახდენს $\Delta U\%$ -ს მნიშვნელობაზე, ხოლო პირველი წვერი იცვლება დატვირთვის პროპორციულად, ნაჩვენები დამოკიდებულება პრაქტიკულად სწორხაზოვანია. ამის შესაბამისად ტრანსფორმატორის გარე მახასიათებელი, ე. ი. დამოკიდებულება $U_2 = f(I_2)$, როდესაც $U_1 = \text{const}$ და $\cos\varphi_2 = \text{const}$, აგრეთვე სწორხაზოვანია.

ბ) მარტივი კმედების კოეფიციენტი. ტრანსფორმატორის ეკონომიურობის მნიშვნელოვან დამახასიათებელ სიდიდეს წარმოადგენს მ. ქ. კ. η, რომელიც ტოლია ტრანსფორმატორის მიერ მეორად წრედში გადაცემული P_2 სიმძლავრის ფარდობისა, მის მიერ პირველად ქსელიდან შთანთქმულ P_1 სიმძლავრესთან:

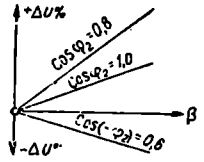
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (8,63)$$



ნახ. 84.



ნახ. 85. ძაბვის პროცენტული ცვლის დამოკიდებულება $\cos\varphi_2$ -გან უცვლელი დატვირთვის დროს.



ნახ. 86. ძაბვის პროცენტული ცვლის დამოკიდებულება დატვირთვისაგან $\cos\varphi_2$ -ს უცვლელი მნიშვნელობის დროს.

სხვაობა $P_1 - P_2$ ტოლია სიმძლავრის დანაკარგებისა, რომლებიც შეიძლება დაყოფილ იქნას ორ ჯგუფად:

1. დანაკარგები მაგნიტურ სისტემაში ანუ ეგრეთ წოდებული უქმი სვლის დანაკარგები, P_6 , ისინი შედგებიან გრიგალურ დენებზე და ჰისტერეზისზე დანაკარგებისაგან, რომლებიც წარმოიშვება ფოლადის გულანაში მთავარი მაგნიტური ნაკადის, დროის მიხედვით ცვალებადობის პროცესში. ეს დანაკარგები დაახლოებით პროპორციულია ინდუქციის კვადრატისა. რადგან უქმი სვლიდან ნომინალურ დატვირთვაზე გადასვლისას ინდუქცია გულანაში იცვლება ძალიან მცირედ, უქმი სვლის დანაკარგები შეიძლება ჩაითვალოს პრაქტიკულად მუდმივად.

ამ დანაკარგებს უნდა მიეკუთვნოს აგრეთვე დანაკარგები ავზის კედლებში და გულანის დამწნებ მეტალურ კონსტრუქციებში, რომლებიც გამოწვეულია მათში ნაწილობრივ გამავალი, მთავარი მაგნიტური არეს ძალხაზებით.

2. დატვირთვის დანაკარგები ანუ ეგრეთწოდებული მოკლედ შერთვის დანაკარგები, P_1 . ამ ჯგუფში ძირითად დანაკარგებს წარმოადგენს გრაგნილებში და გამომყვანებში ჯოლის დანაკარგები P_2 . ამავე ჯგუფს ეკუთვნის დამატებითი დანაკარგები გრაგნილებში, გამომყვანებში, ავზის კედლებში, გულანაში და ა. შ. რომლებიც გაპირობებულია ფანტვის ველით. ეს დანაკარგები დაახლოებით პროპორციულია დატვირთვის დენის კვადრატისა.

ამიტომ მ. ქ. კ-ს გამოსახვა შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_{KH}}, \quad (8,64)$$

სადაც β —მოცემული დატვირთვის ფარდობა ნომინალურთან, P_{KH} კი დატვირთვის დანაკარგები ნომინალური დატვირთვის დროს.

თუ უგულებელვყოფთ ძაბვის ვარდნას უქმი სელიდან დატვირთვაზე გადასვლის დროს, მ. ქ. კ-ს გამოსახვა შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\eta = \frac{\beta P_H \cos \varphi_2}{\beta P_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{KH}}. \quad (8,65)$$

გაუტოლებთ რა $\frac{d\eta}{d\beta} = 0$ ვპოულობთ, რომ მ. ქ. კ. აღწევს მაქსიმალურ

მნიშვნელობას $\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_{KH}}}$ —დატვირთვის დროს. თანამედროვე ძალოვან

ტრანსფორმატორებში $\frac{P_0}{P_{KH}} \approx \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{4}\right)$, რის გამო მათი მ. ქ. კ. მაქსი-

მალურ მნიშვნელობას აღწევს, როდესაც $\beta \approx (0,7 \div 0,5)$.

ნორმალურ ძალოვან ტრანსფორმატორების სიმძლავრისაგან დამოკიდებულებით მ. ქ. კ. ირყევა ზღვრებში 96-დან 99,5%-მდე, ამასთან ქვედა ზღვარი ეკუთვნის 5kVA რიგის სიმძლავრის ტრანსფორმატორებს.

ექსპერიმენტული გზით მ. ქ. კ. განისაზღვრება უქმი სელის და მოკლედ შერთვის ცდების მონაცემებით, რომლებიც საშუალებას გვაძლევენ გავზომოთ ცალ-ცალკე P_0 და P_{KH} .

რადგან ტრანსფორმატორები ჩვეულებრივად მუშაობენ ცვლადი დატვირთვით, ტრანსფორმატორების მუშაობის ეკონომიურობის შეფასებისათვის ზოგჯერ სარგებლობენ ე. წ. წლიური მ. ქ. კ.-ით, წლიური მ. ქ. კ. წარმოადგენს ტრანსფორმატორის მიერ მეორად წრედში წლის განმავლობაში გადაცემულ ენერგიის ფარდობას იმავე პერიოდში პირველად ქსელიდან ტრანსფორმატორის მიერ მიღებულ ენერგიასთან.

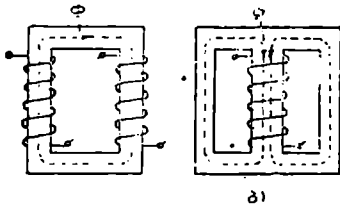
9. ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემა და მარაგნილიზმი

ა) კონსტრუქციის ტიპები. გრაგნილის და მაგნიტური სისტემის ურთიერთ განლაგების მიხედვით განასხვავებენ ტრანსფორმატორის ორ ძირითად

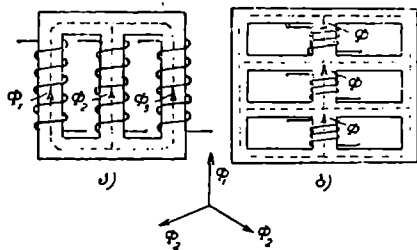
კონსტრუქციას—ღეროვანს და ჯავშნიანს. განსხვავება მათ შორის ჩანს ნახ. 87 და 88-დან. ღეროვან ერთფაზა ტრანსფორმატორში გრაგნილი განლაგებულია გულანას ორ ღეროზე, და მისი ორივე ნაწილი შეიძლება შეერთებულ იქნეს მიმდევრობით ან პარალელურად. ჯავშნიანი კონსტრუქციის ტრანსფორმატორს აქვს განშტოებული მაგნიტური სისტემა, რომელიც ნაწილობრივ ფარავს გრაგნილს, თითქოს „დაჯავშნის“ მას. შუა ღეროს მაგნიტური ნაკადი ორჯერ მეტია, ვიდრე განაპირებში, ამიტომ განაპირა ღეროებს აქვს ორჯერ ნაკლები კვეთი, ვიდრე შუას.

სამფაზა ღეროვან ტრანსფორმატორში ყოველ ფაზას შეესაბამება ერთი ღერო. ყველა ღერო ურთიერთთან დაკავშირებულია უღლებით, და ფაზური მაგნიტური ნაკადები ქმნიან ვექტორების სამფაზა ვარსკვლავს.

სამფაზა ჯავშნიანი ტრანსფორმატორი შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც ერთი მეორის გვერდით დადებული სამი ერთფაზა ჯავშნიანი ტრანსფორმატორი, რომელთაგანაც თვითეულს, შეხებაში მყოფი ჰორიზონტალური ნაწილების კვეთი შემცირებული აქვს ორჯერ (ნახ. 89). ამავე დროს სამი ფაზის გრაგნილები ჩართული უნდა იყოს ისე, რომ ნაკადები, მაგნიტური სისტემის შეხებაში მყოფ ნაწილებში გეომეტრიულად იკრიბებოდეს. ამი-



ნახ. 87. ერთფაზა ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემა. ა—ღეროვანი კონსტრუქციის, ბ—ჯავშნიანი კონსტრუქციის.



ნახ. 88. სამფაზა ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემა. ა—ღეროვანი კონსტრუქციის, ბ—ჯავშნიანი კონსტრუქციის

ტომ შუა გრაგნილს (მაღალი და დაბალი ძაბვების მხრიდან) რთავენ განაპირა გრაგნილების საწინააღმდეგოდ, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 89-ზე. მაშინ შეხებაში მყოფ ნაწილებში ნაკადების გეომეტრიული ჯამი, განაპირა ღეროებში ნაკადის ტოლი იქნება. შუა ფაზის პირდაპირი ჩართვის დროს შეხებაში მყოფ ნაწილებში ნაკადები გეომეტრიულად გამოაქვლება ერთმანეთს. უკანასკნელ შემთხვევაში მოგვიხდებოდა შეხებაში მყოფი ნაწილების კვეთის გაზრდა $\sqrt{3}$ -ჯერ.

ჯავშნიანი კონსტრუქციის ტრანსფორმატორებმა ფართო გავრცელება პოვეს აშშ-ში. უკანასკნელ ხანებში ისინი სულ უფრო მეტად გამოიღვენებიან ღეროვანი ტრანსფორმატორების მიერ, რომლებიც კონსტრუქციულად და წარმოების მხრივ უფრო მარტივია. ევროპაში ჯავშნიანი ტრანსფორმატორები ნაკლებად კეთდება. სსრკ-ში ასევე პპოვა განვითარება უმთავრესად,

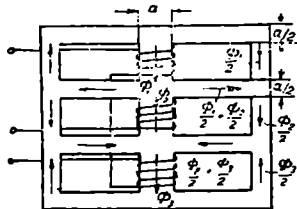
ლეროვანი ტიპის კონსტრუქციამ. შემდგომში განვიხილავთ მხოლოდ ლეროვან ტრანსფორმატორებს.

ბ) გულანა. გულანას ძირითად ელემენტებს წარმოადგენს:

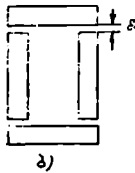
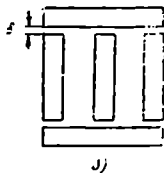
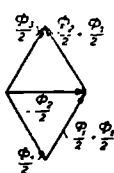
1. ლეროები, რომლებზეც განლაგებულია გრაგნილები.
2. მაგნიტური წრედის შემკვერელი უღლები.

ლეროების უღლებთან შეერთების მიხედვით არსებობს ორი ტიპის გულანა.

დაშინტული და პირაპირისა. საპირაპირო ტრანსფორმატორებში ლეროები და უღლები აიკრიბება პირაპირად, როგორც ეს ნაჩვენებია

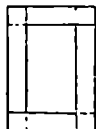
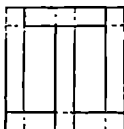
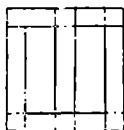


ნახ. 89. სამფაზა ჯავშნიანი ტრანსფორმატორების სქემა.



ნახ. 90. პირაპირა ტიპის გულანები. ა—სამფაზა ტრანსფორმატორის; ბ—ერთფაზა ტრანსფორმატორის.

ნახ. 90-ზე. დაშინტულ ტრანსფორმატორებში ლეროები და უღლები აიკრიბება (დაიშინტება) ერთად, როგორც მთლიანი კონსტრუქცია. გულანას ფურცლების წყობა დაშინტების დროს ნაჩვენებია ნახ. 91-ზე.



ა)

ბ)

ნახ 91. დაშინტული გულანები. ა—სამფაზა ტრანსფორმატორის, ბ—ერთფაზა ტრანსფორმატორის.



ა)



ბ)

ნახ. 92. გულანების კვეთების ნიმუშები. ა—ლეროს კვეთები; ბ—უღლის კვეთები.

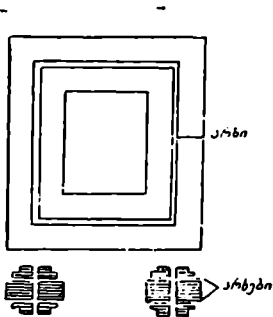
პირაპირი კონსტრუქციის უპირატესობას წარმოადგენს როგორც გულანას, ასევე განსაკუთრებით მთლიანად ტრანსფორმატორის აწყობის და დემონტაჟის შედარებითი სიმარტივე. მაგრამ ამ კონსტრუქციის დიდ ნაკლს წარმოადგენს შედარებითი დიდი საპაერო ღრეჩოები უღლებსა და ლეროებს

შორის, რაც ზრდის დამამაგნიტებელ დენს, და აგრეთვე პირაპირების გახუ-
რების შესაძლებლობას, პირაპირების ადგილებში ფურცლების შეერთების,
გამო, მათში აღძრული დენებისაგან. ამის თავიდან ასაცილებლად გულანებსა
და უღლებს შორის გვიხდება საიზოლაციო შუასადების მოთავსება, რაც კი-
დევე უფრო მეტად ზრდის დამამაგნიტებელ დენს. გარდა ამისა, გულანების
მუარი შეერთების აუცილებლობა უღლებთან, ართულებს მაგნიტური სისტე-
მის მექანიკურ კონსტრუქციას. ამ მიზეზების გამო პირაპირის ტრანსფორმა-
ტორები თანდათანობით გამოდის წარმოებიდან.

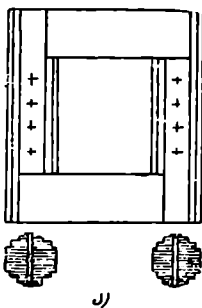
ადგილის გამოყენების თვალსაზრისით გულანას კვეთის საუკეთესო
ფორმას წარმოადგენს წრე. მაგრამ ცალკეულ ფურცლებისაგან აკრებილი
წრიული კვეთის გულანას პრაქტიკულად შესრულება ძალზე ძნელია. ამიტომ
ჩვეულებრივად ღეროები სრულდება საფეხურიანი ფორმით, ამასთან რაც უფ-
რო მეტია ტრანსფორმატორის სიძლიერე, მით უფრო მეტი საფეხურები
აქვს ღეროს. მცირე ტრანსფორმატორების, რომელთა ზომებს და წონებს
არა აქვს პირველხარისხოვანი მნიშვნელობა, ღეროს ხშირად აქვს კვადრატუ-
ლი ფორმა. ღეროს კვეთის ნიმუშები ნაჩვენებია ნახ. 92, ა-ზე.

მძლავრ ტრანსფორმატორებში გულანას უკეთესად გაცივების მიზნით
უქანასკნელის ცალკეულ პაკეტებს შორის სტოვებენ საენტილაციო არხებს.
ზოგჯერ იმისათვის, რომ შევქმნათ არხი გულანას ფურცლების სიბრტყის
პერპენდიკულარულ მიმართულებით, აკეთებენ შედგენილ გულანას, როგორც
ეს ნაჩვენებია ნახ. 93-ზე.

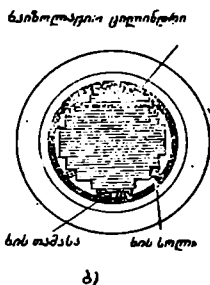
დიდი ტრანსფორმატორების ღეროები მოქერილია ქანქიკების საშუალე-
ბით, რომლებიც სათანადოდ იზოლირებულია ფოლადის ფურცლების შერ-



ნახ. 93. მძლავრი ტრანსფორმატორის შედგენილი გულანა.



ნახ. 94. ტრანსფორმატორების ღეროების გამაგრების ხერხები.



თვის თავიდან ასაცილებლად (ნახ. 94, ა) ტრანსფორმატორის აწყობის
დროს მცირე ტრანსფორმატორების ღეროები მოქერილია ხის თამასებით და
სოლებით (ნახ. 94, ბ).

უღლის კვეთი ჩვეულებრივად რამდენიმედ მეტია გულანას კვეთზე
(20%-მდე). ეს კეთდება უღელში მაგნიტური ინდუქციის შემცირების მიზნით
და ფოლადში დანაკარგების და დამამაგნიტებელი დენის შესაბამისი შემცი-

რებისათვის. ნახ. 92, ბ-ზე ნაჩვენებია ულლის კვეთის ფორმები, რომლებიც გვხვდება პრაქტიკაში.

ულლის ფორმა განისაზღვრება გულანას ცალკეული პაქეტების მაგნიტური წინააღმდეგობით. სათანადო ფორმის შერჩევის დროს შესაძლოა ეს წინააღმდეგობები გავხადოთ ერთნაირი და მივიღოთ ინდუქციის თანაბარი განაწილება გულანას კვეთში.

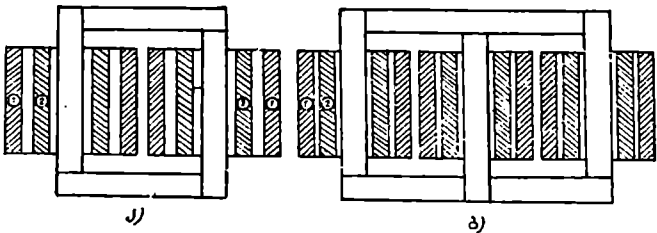
ტრანსფორმატორის ჩონჩხს დამიწება უნდა ჰქონდეს შესრულებული იმგვარად, რომ დამამიწებელმა გამტარებმა არ შექმნას მოკლედ შერთული ხვევი.

ულლების გამაგრება ტრანსფორმატორის სიმძლავრის მიხედვით წარმოებს ხის თამასებით (მცირე სიმძლავრის ტრანსფორმატორებში), ვარცლესებური ფოლადის ძელებით. (საშუალო სიმძლავრის ტრანსფორმატორებში (ნახ. 95, ა) ან სპეციალური შენადული ფოლადის კონსტრუქციებით (დიდი ტრანსფორმატორებში) (ნახ. 95, ბ). ულლის გამამაგრებელი კონსტრუქცია, წარმოადგენს ერთდროულად საყრდენსაც გრაგნილებისათვის.

გულანა ა მომჭერ კანკიკებთან, დამწნებ ძელებთან და სხვა დამხმარე დეტალებთან ერთად წარმოადგენს ტრანსფორმატორის ჩონჩხს.

გ) გრაგნილების ძირითადი ტიპები. მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილების ურთიერთგანლაგების თვალსაზრისით არსებობს მათი შესრულების ორი ხერხი, რის მიხედვითაც გვაქვს კონცენტრული და დისკოსებური მონაცვლე გრაგნილები.

1. კონცენტრული გრაგნილები. ამ კონსტრუქციაში მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილები განლაგებულია კონცენტრულად (ნახ. 96), რის გამოც მიიღო მან თავისი სახელწოდება. ჩვეულებრივად შიგა, წარმოად-

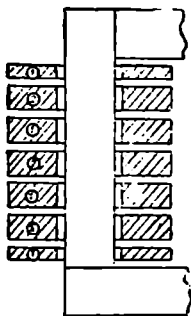


ნახ. 96. ტრანსფორმატორი კონცენტრული გრაგნილებით. ა—ერთფაზა* ტრანსფორმატორი, ბ—სამფაზა ტრანსფორმატორი.

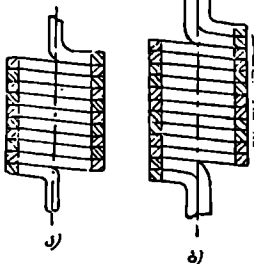
გენს დაბალი ძაბვის გრაგნილს, ვინაიდან უფრო ადვილია მისი იზოლირება დამიწებულ ღეროსაგან. სახელდობრ ამ კონსტრუქციამ მიიღო ყველაზე უფრო მეტი განვითარება საბჭოთა ტრანსფორმატორთმშენებლობაში.

2. დისკოსებური მონაცვლე გრაგნილი. ამ კონსტრუქციაში მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილები განლაგებულია მაგნიტოგამტარზე ურთიერთმონაცვლეობით, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 97-ზე. გრაგნილები

სრულდება ცალკე დისკოების და სექციების სახით. გრაგნილის აწობის შემდგომ სექციებს ერთმანეთთან აერთებენ მიმდევრობით ან პარალელურად. ასეთი გრაგნილები განსაკუთრებით გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როდესაც მო-



ნახ. 97. ტრანსფორმატორი დისკოსებრი მონაცვლე გრაგნილებით.



ნახ. 98. ცილინდრული გრაგნილი. ა—ერთი გამტარისაგან, ბ—ორი პარალელური გამტარისაგან.

ამათანასწორობილი შეუსაღები ჰრესნიისაგან

1	72
2	72
3	72
4	108
5	72
6	72
7	72
8	72
9	72
10	72

ნახ. 99 ორფენა ცილინდრული გრაგნილი.

.ითხოვება დიდი დენები შედარებით მცირე ძაბვის დროს, როგორც, მაგალითად, ელექტროლუმების მკვებავ ტრანსფორმატორებში.

ჩვეულებრივად დისკოსებურ გრაგნილს უფრო ნაკლები მაგნიტური ფანტვა აქვს, ვიდრე კონცენტრულ გრაგნილს, რაც ზოგიერთ შემთხვევებში წარმოადგენს მის უპირატესობას. ეს საკითხი უფრო დაწვრილებით განხილული იქნება ქვემოთ.

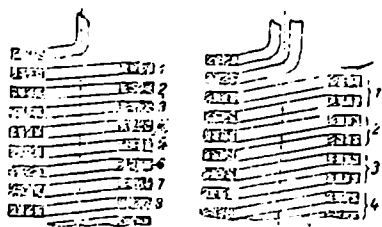
დ) კონცენტრული გრაგნილების კონსტრუქციები. სიმძლავრის, დენის და ძაბვის მიხედვით იხმარება სხვადასხვა კონსტრუქციის გრაგნილები.

1. ცილინდრული გრაგნილი. უმარტივესია, ნახ. 98-ზე ნაჩვენები, ცილინდრული გრაგნილი. ნომინალური დენის მნიშვნელობის მიხედვით ცილინდრული გრაგნილი შეიძლება შესრულებულ იქნეს ერთ, ორ ან რამდენიმე პარალელურ გამტარისაგან. ხშირად ცილინდრული გრაგნილი სრულდება ორ ან რამდენიმე კონცენტრულად განლაგებული ფენის სახით. გრაგნილის გასაცივებელი ზედაპირის გაზრდის მიზნით, ფენებს შორის შეიძლება გაკეთებულ იქნას ღარები ზეთისათვის (ნახ. 99). ასეთი გრაგნილები ჩვენთან კავშირში იხმარება ტრანსფორმატორებში, რომელთა სიმძლავრე აღწევს 560 კVA-მდე, ფაზური ძაბვან kV -მდე და ფაზური დენი—800 A-მდე.

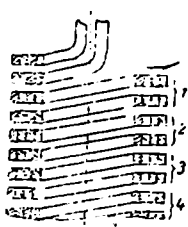
2. ხრახნული გრაგნილი. ხშირად ერთი ზვევის პარალელური გამტარები განლაგდება დახვევის მიმართულებით კი არა (ნახ. 98), არამედ რადიალური მიმართულებით, თვით ზვევები კი ერთმანეთს მისდევენ ხრახნული ხაზით (ნახ. 100). ასეთ გრაგნილს ეწოდება ხრახნული პარალელური გრაგნილი. ხრახნული გრაგნილი შეიძლება იყოს ერთსვლიანი, ორსვლიანი (ნახ. 101), ან მრავალსვლიანი. ხრახნული გრაგნილები ჩვენთან კავშირში

იხმარება ტრანსფორმატორებში, რომელთა სიმძლავრეა 180 kVA და მეტი, 11kV-მდე ფაზური ძაბვისას და 300 A-ზე მეტი ფაზური დენისას.

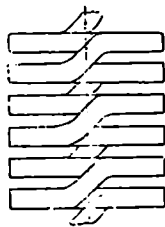
ხრახნული გრაგნილის ცალკეული გამტარების ინდუქტიური და აქტიური წინააღმდეგობის გათანაბრების მიზნით, დახვევის პროცესში კეთდება



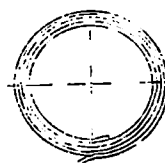
ნახ. 100. ხრახნული პარალელური გრაგნილი.



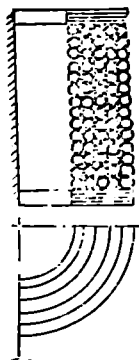
ნახ. 101. ორსულიანი ხრახნული გრაგნილი.



ნახ. 102.



ნახ. 103. უწყვეტი გრაგნილი.



ნახ. 104.

გამტარების ტრანსპოზიცია. ხვევში ოთხი პარალელური—გამტარის შემთხვევისათვის, ტრანსპოზიცია სქემატურად ნაჩვენებია ნახ. 102-ზე.

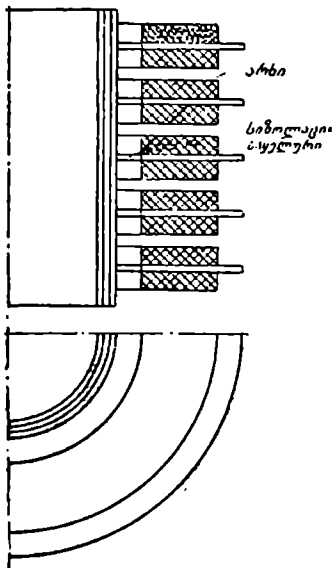
3. უწყვეტი გრაგნილი. უკანასკნელ ხანებში ფართო გავრცელება ჰპოვა ეგრეთწოდებულმა უწყვეტმა სპირალურმა გრაგნილმა. უწყვეტი სპირალური გრაგნილი შედგება ღერძული მიმართულებით, მიმდევრობით განლაგებულ კოქების რიგისაგან, რომელთაგან თვითეთლს აქვს სპირალურად დახვეული ხვევები (ნახ. 103). ამასთან დახვევა წარმოებს განსაკუთრებული ხერხით ერთი გამტარით განუწყვეტლივ, მიჩილვის გარეშე. ეს გრაგნილი ჩვენთან კავშირში იხმარება 180 kVA და მეტი სიმძლავრის ტრანსფორმატორებში, როდესაც ფაზური ძაბვები 3kV და მეტია და, დენებისას, რომელთა დროს შეიძლება გამოვიყენოთ სწორკუთხა გამტარი (გამტარის კვეთი არანაკლებია 6 mm²).

დიდი სიმძლავრეების და ძალზე მაღალი ძაბვის დროს სპირალური გრაგნილი ხანდახან სრულდება ცალკე ან წყვილი დისკოების სახით, რომლებიც შემდეგ შეერთდებიან მიმდევრობით.

ამ შემთხვევაში გრაგნილი არ არის უწყვეტი და სრულდება მიჩილვით.

4. გრაგნილი მრგვალი სპილენძისაგან. 10 mm²-მდე, გამტარის კვეთის დროს დასაშვებია მრგვალი კვეთის გამტარის გამოყენება. ამ შემთხვევაში, როდესაც სიმძლავრე აღწევს 180 kVA-მდე და ძაბვა 6 kV-მდე

შესაძლებელია მრავალფენიანი ცილინდრული გრაგნილის შესრულება (ნახ. 104). დიდი სიმძლავრეების (1 000 *kVA*-მდე) და ძაბვების (35 *kV*-მდე) დროს, ხშირად იხმარება მრავალფენიანი ცილინდრული კოქისებური გრაგნილი (ნახ. 105), ანასთან აწყობის მოხერხებულობისათვის გრაგნილი სრულდება ორმაგი კოქების სახით, რომელთაგან შემდეგ დაკომპლექტდება გრაგნილი.



ნახ. 105.

ე) გრაგნილის იზოლაცია და დამატებითი მოწყობილობა. ტრანსფორმატორის გრაგნილებს უნდა ქონდეს საკმარისი ელექტრული და მექანიკური სიმტკიცე. ამით განისაზღვრება მოთხოვნილებანი განმამბოლოებელი და კონსტრუქციული მასალების მიმართ, რომლებიც გამოიყენება გრაგნილების შესრულების დროს.

მცირე სიმძლავრეების და ძაბვების შემთხვევაში შიგა გრაგნილი ჩამოეცმევა უშუალოდ გულანას ლეროს. ამ შემთხვევაში ხის სოლები და თამასები, რომლებიც წინახევენ ლეროს (ნახ. 94), ერთდროულად ასრულებს გრაგნილის შინაგანი ზედაპირის საყრდენის მოვალეობას. ყველა სხვა შემთხვევაში გრაგნილი გამოყოფილია ლეროსაგან განმამბოლოებელი ცილინდრით (ძლიერ მაღალი ძაბვის დროს ცილინდრების რაოდენობა შეიძლება იყოს ერთზე მეტი).

ტრანსფორმატორთშენებლობაში ფართო გამოყენებას პოულობს საკაბელო ქაღალდისაგან დამზადებული, ბაკელიტის ლაქით გაყვანილი ხისტი განმამბოლოებელი ცილინდრები. ამ შემთხვევაში გრაგნილის დახვევა ხდება უშუალოდ განმამბოლოებელ ცილინდრზე. განმამბოლოებელი ცილინდრების სხვა ნაირსახეობას, რომლებიც განსაკუთრებით ფართოდ იხმარება დიდ ტრანსფორმატორებში, წარმოადგენს სპეციალური განმამბოლოებელ მუყაოსაგან დამზადებული ეგრეთწოდებული „რბილი“ ცილინდრები. ამ ცილინდრებს, ტრანსფორმატორის აწყობის პროცესში, ახვევენ ლეროზე (გრაგნილზე) ცალკეულ ფურცლებისაგან საჭირო სისქემდე.

ხშირად გრაგნილის ვაცივების ზედაპირის გაზრდის მიზნით, მასსა და განმამბოლოებელ ცილინდრს შორის სტოვებენ ზეთის არხებს. არხის შესაქმნელად იხმარება, გრაგნილსა და ცილინდრს შორის მთელი გარშემოწერილობის გასწვრივ გარკვეული ინტერვალებით განლაგებული სპეციალური სადისტანციო ლარტყები. სადისტანციო ლარტყები ჩვეულებრივ აიკრიბება მაღალი ტემპერატურის დროს შეწებებულ და დაწნეხილ პრესშპანის ზოლები-საგან. ასეთივე ლარტყები იხმარება სხვა შემთხვევებშიც, როდესაც საკი-

როა შეიქმნას არხი ღეროს ღერძის პარალელური მიმართულებით (მაგალითად, მრავალფენიან ცილინდრულ გრაგნილებში).

მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილებს შორის იზოლაცია სრულდება მონაცვლე განმამზოლოებელი ცილინდრების და ზეთიანი არხების სახით¹. ექსპერიმენტული გამოკვლევები გვაჩვენებენ, რომ მყარი იზოლაციის და სატრანსფორმატორო ზეთის ასეთი მონაცვლეობა ამაღლებს ელექტრულ სიმტკიცეს, წმინდა ზეთიან შუალედების სიმტკიცესთან შედარებით.

გრაგნილების იზოლაცია უღლებსაგან, სრულდება პრესშპანის ბრტყელი რგოლების სახით, რომლებიც გრაგნილის ტორზებისაგან და უღლებსაგან (ხანდახან კი ერთიმეორესაგანაც) განცალკევებულია გრაგნილის გარშემოწერილობაზე განლაგებული საიზოლაციო ფენილებით.

ბევრ შემთხვევაში მეზობელ ფაზების გრაგნილებს შორის ელექტრული სიმტკიცის გაზრდა მიზნით მათ შორის დგამენ ვერტიკალურ განმამზოლოებელ ზღუდეებს.

ზოგჯერ, განსაკუთრებით მაღალძაბვიან ტრანსფორმატორებში, გრაგნილსა და ავზს შორის ელექტრული სიმტკიცის გაზრდისათვის გრაგნილს დაედება მთლიანი ვერტიკალური საიზოლაციო საშისი, რომელიც გარს ევლება ყველა ფაზებს.

გრაგნილებს შორის, და აგრეთვე გრაგნილისა და დამიწებულ ნაწილებს შორის (გულანა, ავზი) იზოლაციას, თვითეული გრაგნილის შინაგან იზოლაციისაგან განსხვავებით ეწოდება მთავარი იზოლაცია.

ბევრ შემთხვევაში გრაგნილის გაცივების ზედაპირის გაზრდის მიზნით ან კიდევ მეზობელ კოქებს (ხვევებს) შორის ელექტრული სიმტკიცის გაზრდის მიზნით უკანასკნელები დაიყოფა განივი (ღეროს ღერძის მიმართულების პერპენდიკულარულ) არხებით. ამ მიზნისათვის იხმარება სპეციალური ფენილები, რომლებიც ჩვეულებრივად მზადდება დაწნეხილ პრესშპანისაგან. ფენილების რიცხვი გარშემოწერილობაზე შეესაბამება სადისტანციო ლარტყების რიცხვს, რომელთანაც ისინი შეუღლებიან (ნახ. 263). ზოგჯერ იხმარება სპეციალური კონსტრუქციის ფენილები, რომლებიც აღისტანციოებენ კოქებს არა მხოლოდ ერთი მეორისაგან, არამედ შინაგან საიზოლაციო ცილინდრისაგანაც.

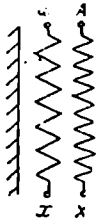
გრაგნილის შემადგენელ ნაწილს წარმოადგენს გამოწყვანები, ე. ი. გამტარების სისტემა, რომელიც აერთებს როგორც გრაგნილის ცალკეულ ნაწილებს ურთიერთ შორის, ასევე გრაგნილს გამავალ იზოლატორებთან². ტრანსფორმატორის სიმძლავრის, ძაბვის და სხვა მონაცემების მიხედვით გამოწყვანები სულ სხვადასხვა კონსტრუქციისაა და შეიძლება შესრულდეს იქნეს სპილენძის სალტყების, სპეციალური კაბელის, რვალის ან სწორკუთხა სპილენძის სახით. სხვადასხვაგვარია გამოწყვანების იზოლაციაც. საკმაოდ დაბალი ძაბვის დროს გამოწყვანები სრულიად არ განმზოლოვდება. პირიქით, მაღალძაბვიან ტრანსფორმატორების გამოწყვანების იზოლაცია წარმოადგენს

¹ ტრანსფორმატორებში იზოლაცია ძალზე მაღალ ძაბვაზე განხილული იქნება II ნაწილში § 19.

² იხ. ქვემოთ II ნაწილი, § 21.

კონსტრუქციის ფრიად საპასუხისმგებლო ელემენტს. გამომყვანების განმზო-
ლოებისათვის ჩვეულებრივად იხმარება საკაბელო ქაღალდი. ძნელადმისადგომ
ადგილების განმზოლოებისათვის იხმარება ლაქქსოვილი.

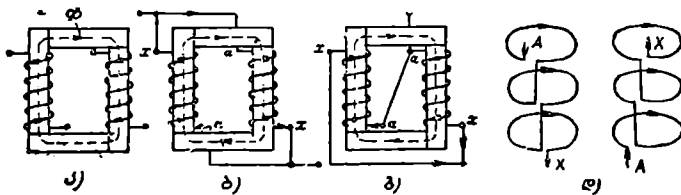
ასევე სხვადასხვაგვარია გამომყვანების სამაგრების კონსტრუქციებიც.
გამომყვანების მზიდი კონსტრუქციების ძირითად მასალას ჩვეულებრივ წარ-
მოადგენს გამომშრალი ხე (წიფელი, კოპიტი). კონსტრუქცია ჩვეულებრვ
წარმოადგენს ვერტიკალური ლარტყების და ჰორიზონტალუ-
რი თამასების სისტემას, რომლებზედაც მაგრდება გამომ-
ყვანები.



ფიგ. 106.

ვ) გრაგნილების აღნიშვნები და შეერთებები. OCT
2524-ის მიხედვით ერთფაზა ტრანსფორმატორისათვის მიღე-
ბულია გრაგნილების შემდეგი აღნიშვნები: მაღალი ძაბვის
გრაგნილის დასაწყისი აღინიშნება A , ხოლო ბოლო X ; და-
ბალი ძაბვის დასაწყისი და ბოლო აღინიშნება შესაბამისად
 a და x (ნახ. 106). თუმცა გრაგნილის დასაწყისის და ბო-
ლოს ცნება პირობითია, მაგრამ ის ძალიან ბნიშნელოვანია
გრაგნილების შეერთების დროს. დავეუშვათ მაგალითად, რომ

ერთფაზა ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილები შესრულებულია ისე,
როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 107, ა-ზე (პირველად გრაგნილებს არ ვაჩვენებთ,
დაეკმაყოფილდებით რა მაგნიტური არეს სქემატური გამოსახვით). თუ
არსებობს მეორადი გრაგნილების პარალელური შეერთების საჭიროება, მა-
შინ დაუშვებელი იქნებოდა ამ შეერთების შესრულება ნახ. 107, ბ-ზე ნაჩვენებ
სქემით, ასეთი შეერთება იქნებოდა გრაგნილის მოკლედ შერთვა. სწო-
რე იქნება შეერთება ნახ. 107, გ-ზე მოცემული სქემით, რომლის დროსაც
ერთდება ერთსახელა მომქერები. რომ გვექონდეს ნახ. 107, ბ-ზე სქემით შე-
ერთების შესაძლებლობა, უნდა შევცვალოთ ერთ-ერთი გრაგნილის დახვევის



ნახ. 107.

მიმართულება. დახვევის მიმართულების შეცვლა, სცვლის გრაგნილში და-
ინდუქტირებულ ე. მ. ძის მიმართულებას ისე, როგორც ეს ჩანს ნახ.
107, დ-დან.

გრაგნილების შეერთების დროს მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული,
თუ როგორ არის ორიენტირებული ე. მ. ძ-ის ერთსახელა ბოლოების მიმართ.

OCT-ის მიხედვით სამფაზა ტრანსფორმატორებში, მაღალი ძაბვის ფა-
ზური გრაგნილების დასაწყისები აღინიშნება A, B, C და სათანადოდ გრაგ-

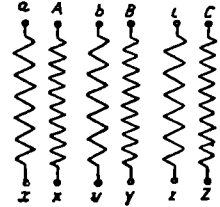
ნილის ბოლოები X, Y, Z . დაბალი ძაბვის ფაზური გრაგნილების დასაწყისები აღინიშნება a, b, c , ბოლოები კი შესაბამისად x, y, z (ნახ. 108).

სამუაზა ტრანსფორმატორების გრაგნილებისათვის არსებობს შეერთების ორი მთავარი ხერხი (სქემა): შეერთება სამკუთხედად და შეერთება ვარსკვლავად, რომლებიც სქემატიურად ნაჩვენებია ნახ. 109-ზე.

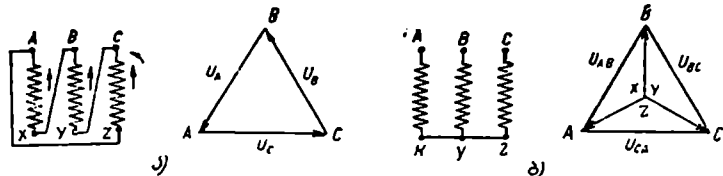
გრაგნილების სამკუთხედად შეერთების დროს ფაზური ძაბვა ტოლია ხაზურის, ხოლო ფაზური დენი, ნაკლებია ხაზურზე $\sqrt{3}$ -ჯერ. გრაგნილების ვარსკვლავად შეერთების დროს ფაზური ძაბვა ნაკლებია ხაზურზე $\sqrt{3}$ -ჯერ, ხოლო ფაზური დენი ტოლია ხაზურის. ამრიგად, ხაზური ძაბვის, ხაზური დენის, და გულანაში ძნელუქიის, ერთი და იგივე მნიშვნელობების დროს, სამკუთხედად შეერთებულ გრაგნილს უნდა ჰქონდეს $\sqrt{3}$ -ჯერ მეტი ხვევი, ვიდრე ვარსკვლავად შეერთებულ გრაგნილს, ამასთან ხვევის კვეთი შეიძლება აღებულ იქნეს $\sqrt{3}$ -ჯერ ნაკლები.

ხშირად ვარსკვლავად შეერთებული გრაგნილის ნეიტრალურ წერტილიდანაც კეთდება გამომყვანი ტრანსფორმატორის ხუფზე. ეს გამომყვანი აღინიშნება 0. ნახ. 110-ზე ნაჩვენებია გამომყვანების განლაგება ტრანსფორმატორის ხუფზე OCT 2524-ს მიხედვით.

სამუაზა ტრანსფორმატორის გრაგნილების შეერთების ნაჩვენები სქემების გარდა არსებობს აგრეთვე „ზიგზაგად“ შეერთების სქემა, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 111-ზე. ზიგზაგად შეერთება გამოყენებას პოულობს სპეციალურ შემთხვევაში, მაგრამ შეერთების ამ ხერხმა ფართო გავრცელება ვერ ჰპოვა უმთავრესად მისი არაეკონომიურობის გამო. იმის გამო, რომ ზიგზაგად შეერთების დროს ფაზური ძაბვა წარმოადგენს ნახევარფაზური ძაბვების გეომეტრიულ სხვაობას, შეერთების ამ ხერხის შემთხვევაში სპილენძის ხარჯი მეტია, ვიდრე სხვა ხერხით



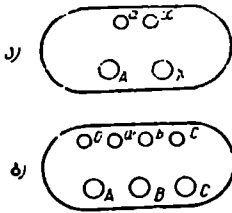
ნახ. 108. სამუაზა ტრანსფორმატორის გრაგნილების აღნიშვნები.



ნახ. 109. სამუაზა ტრანსფორმატორის გრაგნილების შეერთების ძირითადის ქემები. ა—სამკუთხედად შეერთება; ბ—ვარსკვლავად შეერთება.

შეერთების დროს, იმდენჯერ, რამდენჯერაც ფაზური ძაბვების მდგენელების არითმეტიკული ჯამი მეტია მათ გეომეტრიულ სხვაობაზე, ე. ი. $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1,16$ -ჯერ.

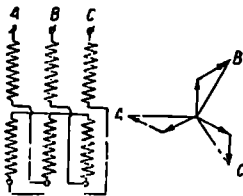
ზ) გრაგნილების შეერთების ჯგუფები. სამუაზა ტრანსფორმატორში ან ერთმუაზა ტრანსფორმატორების სამუაზა ჯგუფში გრაგნილების შეერთების ხერხს ძალზე დიდი მნიშვნელობა აქვს, ვინაიდან მისგანაა დამოკიდებული ძვრის კუთხე მეორად და პირველად დაბევებს შორის. ამ საკითხის გამოკვევისათვის თავდაპირველად განვიხილოთ ტრანსფორმატორი, რომლის გრაგნილები შეერთებულია ისე, როგორც ეს ნახევრებია ნახ. 112-ზე. ასეთ შეერთებას ეწოდება— შეერთება ვარსკვლავი—ვარსკვლავი, ან „იგრეკ-იგრეკი“ და აღინიშნება Y/Y .



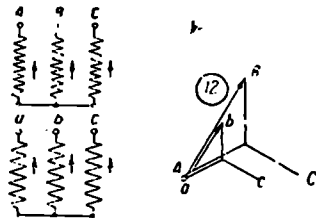
ნახ. 110. გამოყენების განლაგება ტრანსფორმატორის ხუფზე, ა—ერთმუაზა ტრანსფორმატორი, ბ—სამუაზა ტრანსფორმატორი.

ნახ. 112-ზე, ისევე, როგორც შემდეგ სქემებში ორივე გრაგნილის ბოლოების ასოითი აღნიშვნა განლაგებულია იმ თანმიმდევრობით, როგორც ისინი სჩანს ტრანსფორმატორის ხუფზე მაღალი ძაბვის გრაგნილის გამოყენების მხრიდან¹.

მივიღოთ, რომ მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილების დახვევის მიმართულება ერთნაირია, მაშინ ე. მ. დ. ორივე გრაგნილში მიმართულებით თანხედენილი იქნება. მისი მიმართულება მივიღოთ ისეთი, როგორც ეს ნახევ-



ნახ. 111.



ნახ. 112.

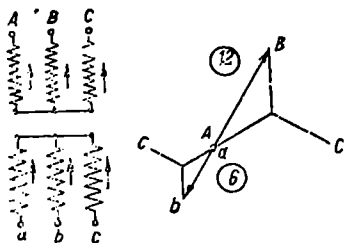
ნებია ისრებით (ნახ. 112-ზე.) ამ ნახაზზე გამოსახულია ორივე გრაგნილის ე. მ. ძბის დიაგრამა, რომლიდანაც სჩანს, რომ AB და bc მოქპერებს შორის მოქმედი ე. მ. ძბი ფაზით არის თანხედენილი.

თუ ერთი გრაგნილის, მაგ. დაბალი ძაბვის გრაგნილის ბოლოებს და დასაწყისებს შეეუსვლით ადგილებს (ნახ. 113), ეს ფაზური ე. მ. ძბის 180° -ით დაძვრის ტოლფასი იქნება. ამ შემთხვევაში ერთსახელა მოქპერებს შორის ე. მ. ძბი აღმოჩნდება ერთმანეთის მიმართ დაძრული ასევე 180° -ით.

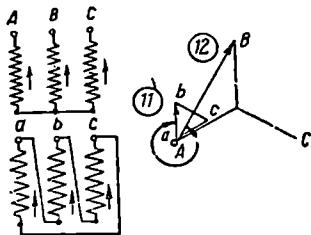
ვექტორული დიაგრამის აგების დროს უნდა ვიხელმძღვანელოთ იმით, რომ ერთ და იგივე გულანაზე მოთავსებული მაღალი და დაბალი ძაბვების

¹ თვითველი გრაგნილის ბოლოების აღნიშვნის თანმიმდევრობა სქემაზე, ზოგჯერ მიღებულია ისეთი, როგორც ეს მოჩანს ხუფზე, მოცემულ გრაგნილის გამოყენების მხრიდან (ნახ. 110). ამ შემთხვევაში ასოითი აღნიშვნის თანმიმდევრობა დაბალი ძაბვის გრაგნილის მხარეზე, რომელიც მიღებულია ნახ. 112-ზე, იცვლება საწინააღმდეგოზე.

გრაგნილებში ე. მ. ძ-ის ვექტორები თანხედენილია ფაზით, თუ დროის ყოველ მოცემულ მომენტში ამ გრაგნილების ე. მ. ძ-ში მიმართულია ერთსახელო ბოლოებისაკენ (ნახ. 112); წინააღმდეგ შემთხვევაში ე. მ. ძ-ში დაძრული იქნება 180° -ით (ნახ. 113).

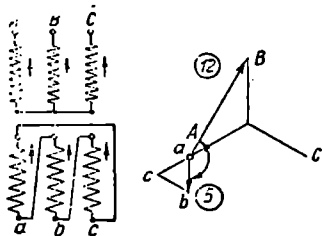


ნახ. 113.

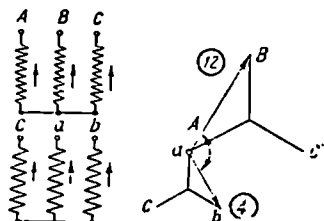


ნახ. 114. შეერთება Y/Δ .

ამის შემდეგ განვიხილოთ ნახ. 114-ზე მოცემული სქემა, სადაც ერთი გრაგნილი შეერთებულია სამკუთხედად, მეორე კი ვარსკვლავად. ასეთ შეერთებას ეწოდება „იგრეკ-დელტა“ (ან „დელტა-იგრეკი“) და აღინიშნება Y/Δ , თუ ვარსკვლავად შეერთებულია მაღალი ძაბვის გრაგნილი, ან Δ/Y , თუ ვარსკვლავად შეერთებულია დაბალი ძაბვის გრაგნილი. სამკუთხედად შეერთებულ გრაგნილში ფაზათა შორის ე. მ. ძ. ტოლია ფაზის ე. მ. ძ-ის. ამიტომ აღებულ შემთხვევაში მ. ძ. (მაღალი ძაბვის) და დ. ძ. (დაბალი ძაბვის) გრაგნილების ერთსახელო მოპყერებს შორის მოქმედი ე. მ. ძ-ში დაძრულია ურთიერთ შორის 330° -ით (ან 30°).



ნახ. 115. ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ბის ძერის შეცვლა Y/Δ შეერთების დროს.



ნახ. 116. ერთ-ერთი გრაგნილის აღნიშვნების წრიული გადანაცვლება Y/Y შეერთების დროს.

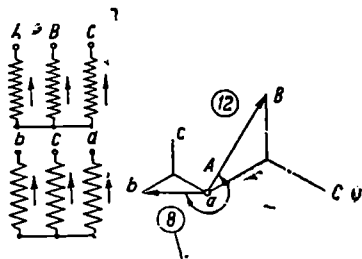
თუ ნახ. 114-ზე მოცემულ სქემაში ადგილებს შევეუცვლით ერთ-ერთი გრაგნილის დასაწყისებს და ბოლოებს, მაშინ ისე, როგორც ეს ნახ. 115-ზეა ნაჩვენები ერთი გრაგნილის ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ის ძერა მეორე გრაგნილის ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ის მიმართ 150° -ის ტოლი იქნება.

ნახ. 112-ზე ნაჩვენებ სქემაში მოვახდინოთ ერთი გრაგნილის ბოლოების აღნიშვნის წრიული გადანაცვლება, ესე იგი მივიღოთ ნახ. 116-ზე მოცემული

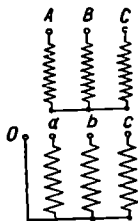
აღნიშვნები. როგორც ჩანს ნახ. 116-ის დიაგრამიდან, ამ შემთხვევაში ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ის ძვრის კუთხე ტოლია 120° -ის. თუ მოვახდენთ კიდევ ერთ გადანაცვლებას, მაშინ, როგორც ნახ. 117-დან ჩანს, ძვრის კუთხე ტოლი აღმოჩნდება 240° -ის. ამრიგად, აღნიშვნების ყოველი წრიული გადანაცვლება სცვლის ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ის ძვრის კუთხეს 120° -ით.

ძნელი არ არის დარწმუნება იმაში, რომ ნახ. 114-ზე მოცემულ სქემაში აღნიშვნების ასეთივე წრიული გადანაცვლებით შეიძლება მივიღოთ ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ის დაძვრა 90° და 210° -თ, ნახ. 115-ზე მოცემულ სქემაში—ძვრა 270° -ით და 30° -ით, და ნახ. 113-ზე მოცემულ სქემაში— 300° -ით და 60° -ით.

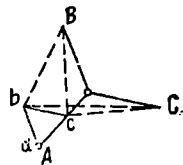
ამრიგად, გრაგნილების შეერთების სქემისა და ბოლოების აღნიშვნებისაგან დამოკიდებულებით შეიძლება მიღებულ იქნეს ერთი გრაგნილის ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ის, მეორე გრაგნილის ფაზათა შორის ე. მ. ძ-თან ძვრის კუთხის 12 მნიშვნელობა. ეს ძვრები ერთი-მეორეს მიყვება 30° -ანი ინტერვალით. ამიტომ, მოსახერხებელია ორივე გრაგნილის ე. მ. ძ-ბის ფაზების ძვრისათვის—საათის აღნიშვნით სარგებლობა. თუ მაღალი ძაბვის გრაგნილის ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ის ვექტორა ორიენტირებული იქნება საათის ციფერ-



ნახ. 117. აღნიშვნების ორჯერადი წრიული გადანაცვლება Y/Y შეერთების დროს.



ნახ. 118.



ნახ. 119. ტოპოგრაფიული დიაგრამა $r/\Delta-11$ შეერთების დროს.

ბლატის 12 საათზე, და მივიღებთ საათის დიდ ისრად, მაშინ დაბალი ძაბვის გრაგნილის ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ის ვექტორის (პატარა ისარი) მიმართულება გვიჩვენებს ფაზათა ძვრას „საათებში“, ამასთან ყოველი საათი შეესაბამება 30° -ს. ფაზათა ძვრა ჩვეულებრივად აღინიშნება არა გრადუსებში, არამედ საათის ციფერბლატის ციფრებით.

ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ის ძვრა ახასიათებს გრაგნილების შეერთების ჯგუფს. მაგ. ნახ. 114-ზე წარმოდგენილია ჯგუფი $Y/\Delta-11$ (იკითხება „იგრეკ-დელტა თერთმეტი“). თუ ვარსკვლავად შეერთებულ გრაგნილს აქვს გამოყვანი ნეიტრალიდან, მაშინ მას აღნიშნავენ Y_0 -ით. მაგ. ნახ. 118-ზე ნაჩვენებია შეერთების სქემა Y/Y_0-12 („იგრეკ-იგრეკ ნულოვანი თორმეტი“).

შეერთების ჯგუფების თვალსაზრისით ზიგზავად შეერთება სამკუთხედიან შეერთების გვევიანენტურია. იგი აღინიშნება ასოთი Z.

$Y/Y, \Delta/\Delta, Z/\Delta$ და Δ/Z შეერთებები ქმნიან მხოლოდ 2, 4, 6, 8, 10, 12 წველ ჯგუფებს.

$Y/\Delta, \Delta/Y, Y/Z$ და Z/Y შეერთებები ქმნიან მხოლოდ 1, 3, 5, 7, 9, 11 კენტ ჯგუფებს, როგორც შემდეგ ვნახავთ. შეერთების ჯგუფებს აქვს ძალზე დიდი მნიშვნელობა ტრანსფორმატორების პარალელური მუშაობისათვის.

თ) შეერთების ჯგუფების შემოწმება ცდის საშუალებით. შეერთების მოცემული ჯგუფის შესრულების სისწორე შეიძლება ექსპერიმენტალურად შემოწმებულ იქნეს შემდეგნაირად.

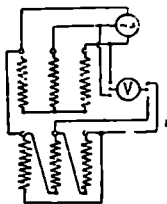
ავაგებთ რა მოცემული ტრანსფორმატორის ფაზათა შორის ე. მ. ძ-ბის ვექტორულ დიაგრამას და შევათავსებთ ორივე გრაგნილის რომელიმე ერთ-სახელა წერტილებს ისე, როგორც ამას ვაკეთებდით ზემოთ, შეიძლება განვსაზღვროთ დაბეა ორ ნებისმიერ წერტილს შორის ტოპოგრაფიული მეთოდით. შეერთების ყოველ ჯგუფს ტოპოგრაფიულ დიაგრამაზე შეესაბამება დაბეების გარკვეული თანაფარდობა.

მაგალითისათვის ავიღოთ ჯგუფი $Y/\Delta-11$, რომლის ტოპოგრაფიული დიაგრამა გამოსახულია ნახ. 119-ზე. სიმარტივისათვის მივიღოთ რომ ვექტორი $ab=1$. თუ ფაზათა შორის დაბეის ტრანსფორმატორაციის კოეფიციენტი არის k , მაშინ bB, bC, cB, cC ე. მ. ძ-ბის ვექტორების მოდულები დებულობენ შემდეგ გამოსახვებს:

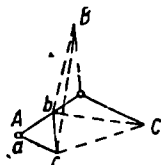
$$bB = \sqrt{k^2 + 1 - \sqrt{3}k}; \quad bC = \sqrt{k^2 + 1};$$

$$cB = \sqrt{k^2 + 1 - \sqrt{3}k}; \quad cC = \sqrt{k^2 + 1 - \sqrt{3}k}.$$

იგივე სიდიდეები შეიძლება გაზომილ იქნეს ნახ. 120-ზე მოცემული სქემის მიხედვით. ცდის დროს მოკლედ ერთდება მ. ძ და დ. ძ. გრაგნილების ორი რომელიმე ერთსახელა გამომყვანი, რაც შეესაბამება ტოპოგრაფიულ დიაგრამაზე ერთსახელა წერტილების შეთავსებას. ერთ-ერთ გრაგნილზე მოიყვანება დაბეა და გაიზომება დაბეა მ. ძ. და დ. ძ. გრაგნილების სხვადასხვა მოპქერებს შორის.



ნახ. 120. ცდის სქემა გრაგნილების შეერთების ჯგუფის განსაზღვრისათვის.



ნახ. 121. ტოპოგრაფიული დიაგრამა $Y/\Delta-1$ შეერთების დროს.

თუ გაზომვების დროს მიიღება იგივე მნიშვნელობები, რაც გამოთვლისას, მაშინ შეერთების ჯგუფი შესრულებულია სწორად. ამასთან მხედველობაში უნდა გვექონდეს, რომ გაზომილი სიდიდეები ზუსტად უნდა შეესაბამებოდეს ტოპოგრაფიულ დიაგრამას. მაგალითად ნახ. 121-ზე მოცემულ დიაგრამაზე გვაქვს ე. მ. ძ-ის შემდეგი მნიშვნელობანი:

$$bB + \sqrt{k^2 + 1 - \sqrt{3}k};$$

$$cB = \sqrt{k^2 + 1};$$

$$bC = \sqrt{k^2 + 1 - \sqrt{3}k};$$

$$cC = \sqrt{k^2 + 1 - \sqrt{3}k}.$$

რაოდენობრივად მიღებული იქნა იგივე მნიშვნელობები, რაც ნახ. 119-ზე ნაჩვენებ დიაგრამიდან, მაგრამ ყველა ერთსახელა ე. მ. ძ-ში არ არის ორივე შენობებში ერთნაირი. ნახ. 121-ზე ნაჩვენები დიაგრამა შეესაბამება $Y/\Delta-1$ ჯგუფს. OCT 2524-ის მიხედვით საბჭოთა ტრანსფორმატორთმშენებლობაში მიღებულია შეერთების შემდეგი სტანდარტული ჯგუფები: Y/Y_0-12 , და $Y/\Delta-11$, მაგრამ ზოგჯერ გვხვდება სხვა ჯგუფებიც.

OCT-ის მიხედვით ერთფაზა ტრანსფორმატორისათვის გათვალისწინებულია მხოლოდ ჯგუფი 12, ამასთან ასეთი ტრანსფორმატორების გრაგნილების შეერთების სქემის პირობითი აღნიშვნისათვის მიღებულია $I/1-12$.

ნახ. 122-ზე მოცემულ ცხრილში მოყვანილია შეერთების ჯგუფები და მათი შესაბამისი, გრაგნილების შეერთების სქემები.

10. მოკლენები ტრანსფორმატორის გულანის დამამკინებლის დროს

ა) უქმი სვლის მახასიათებელი. მთავარი მაგნიტური ნაკადი Φ , i_r, ω_1 დამამკინებელ ძალასთან დაკავშირებულია შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\Phi = BS_c = \mu_0 \mu H S_c = \frac{\mu_0 \mu i_r \omega_1 S_c}{l}, \quad (10,1)$$

სადაც B და H —გულანაში არეს ინდუქცია და დაძაბულობა, S_c —გულანის აქტიური კვეთა, მას ჩვენ ვღებულობთ უცვლელად გულანის მთელ l სიგრძეზე. $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} H/cm$, i_r — I_0 დენის I_r რეაქტიული მდგენელის მყისა მნიშვნელობა.

საპაერო ტრანსფორმატორის შემთხვევაში B ინდუქცია დამამკინებელი ძალის პირდაპირპროპორციული იქნება. ფოლადის გულანის შემთხვევაში კი ეს დამოკიდებულება ხდება უფრო რთული და არ ემორჩილება მკაცრ მათემატიკურ ანალიზს, ფოლადის მაგნიტური განვლადობის მრუდის $\mu = \varphi(H)$ თავისებური ფორმის გამო.

მრუდი $B = f(I_r)$ ან მისი პროპორციული მრუდი $E = \psi(I_r)$ ატარებს ტრანსფორმატორის მაგნიტური მახასიათებლის ან უქმი სვლის მახასიათებლის სახელწოდებას. ეს მახასიათებელი შეიძლება მიღებულ იქნეს ექსპერიმენტულად. ამისათვის საჭიროა განვახორციელოთ ტრანსფორმატორის უქმი სვლის სქემა, ისე, რომ ამ დროს იყოს, ტრანსფორმატორზე მოყვანილი ძაბვის ცვალებადობის შესაძლებლობა. გავზომავთ რა ტრანსფორმატორის მომკერებზე ძაბვის ყოველ მნიშვნელობას, პირველად გრაგნილში გამავალ $I_{10} = I_0$ უქმი სვლის დენს და განვსაზღვრავთ მის I_r რეაქტიულ მდგენელს, მივიღებთ დამოკიდებულებას: $U = E = \psi(I_r)$. ეს დამოკიდებულება საშუაზა ტრანსფორმატორებში გადაიღება ყოველი ფაზისათვის ცალკე.

ბ) დამამკინებელი დენის ე. მ. ძ-ის უმაღლესი პარამონიკები. დაუშვავად, რომ ტრანსფორმატორთან უქმი სვლის დროს მოყვანილი ძაბვა ზუსტად სინუსოიდურია. იმის გამო, რომ $u = e_1$ ე. მ. ძ. პრაქტიკულად სინუსოიდური იქნება. ე. მ. ძ-სა და ინდუქციას შორის სწორხაზოვანი დამოკიდე-

წყვილი 33უფები

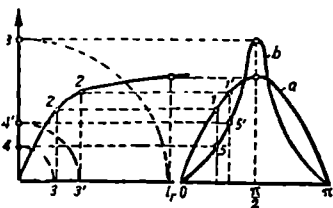
ჯგუფი	კ.ძ.ძ კუთხეები ძ.რ.	საბუჩი, 23 კუთხეები ძ.რ.	მუკრეთის აქტი და პასივი ნების აღნიშვნები			ჯგუფი	კ.ძ.ძ კუთხეები ფეხი	აბგოი კუთხეები საბუჩი	მუკრეთის აქტი და პასივი ნების აღნიშვნები			
			y/y	Δ/Δ	Δ/z				y/ Δ	Δ/y	y/z	
12	0°				11	330°						
4	120° (0°+120°)				3	90° (330°+120°)						
8	240° (0°+240°)				7	210° (330°+240°)						
6	180°				5	150°						
10	300° (180°+120°)				9	270° (150°+120°)						
2	60° (180°+240°)				1	30° (150°+240°)						

კენტი 33უფები

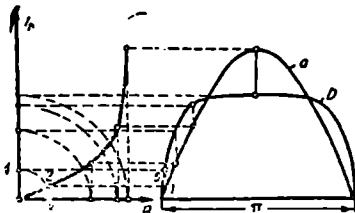
ნახ. 122. გრაგნილების შეერთების კავშირების და სემების ცხრილი.

ბულებების გამო ეს უკანასკნელიც ასევე სინუსოიდური იქნება. ამ შემთხვევაში არ იქნება სინუსოიდური დენი i_r , რომელიც განისაზღვრება უკმი სვლის არასწორხაზოვანი მახასიათებლით. i_r —დენის მრუდის ფორმა, ინდუქციის მრუდის სინუსოიდური ფორმის შემთხვევაში, ერთფაზა ტრანსფორმატორისათვის ნაჩვენებია ნახ. 123-ზე. მაგნიტური მახასიათებლის დახმარებით დენის მრუდის აგების მიმდევრობა ისრებითაა აღნიშნული ნახ. 123-ზე.

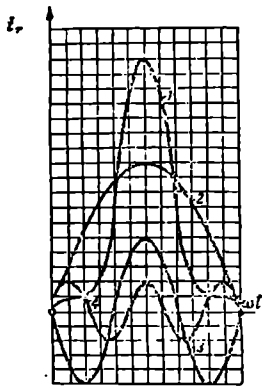
i_r დენის მრუდის დამახინჯება როგორც ეს ნათელია ნახ. 124-დან განისაზღვრება მასში მესამე, მეხუთე, მეშვიდე და ა. შ. უმაღლესი ჰარმონიკების არსებობით. დენის მრუდის დამახინჯება მით უმეტე იქნება, რაც მეტადაა



ნახ. 123. დენის მრუდის გრაფიკული განსაზღვრა მაგნიტური მახასიათებლის საშუალებით. $a-B$ ინდუქციის სინუსოიდური მრუდი; $b-i_r$ დენის მრუდი.



ნახ. 125. B ინდუქციის მრუდის გრაფიკული განსაზღვრა სინუსოიდური დამამაგნიტებელი დენის შემთხვევაში. $a-i_r$ დენის მრუდი; $b-B$ ინდუქციის მრუდი.



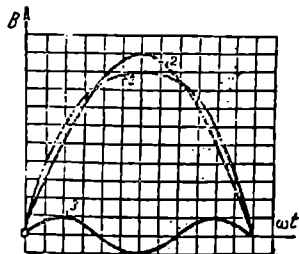
ნახ. 124. დენის მრუდის დაშლა უმაღლეს ჰარმონიკებად: 1— i_r დენი; 2—დენის პირველი ჰარმონიკი; 3—დენის მესამე ჰარმონიკი; 4—დენის მეხუთე ჰარმონიკი.

გაელენთილი გულანა. ყველაზე მეტ გავლენას ახდენს მესამე ჰარმონიკი, რომელსაც გაელენთილ ტრანსფორმატორებში შეუძლია მიაღწიოს ძირითადი ტალღის 50—60%. სწორედ მესამე ჰარმონიკი წარმოადგენს განსაკუთრებულ პრაქტიკულ ინტერესს სამფაზა დენის ტრანსფორმაციის დროს.

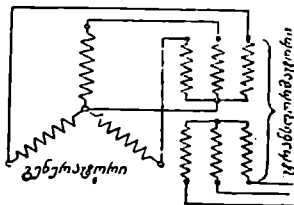
სამფაზა ტრანსფორმატორის (ან ერთფაზა ტრანსფორმატორების სამფაზა ჯგუფის) ყველა სამ გრაგნილში დენის მესამე ჰარმონიკები ფაზით თანხედენილია.

მესამე ჰარმონიკის გამოვლინება სხვადასხვაგვარია ტრანსფორმატორის გრაგნილების შეერთების ხერხისაგან დამოკიდებულებით. გრაგნილების Y/Y'

სქემით შეერთების შემთხვევაში დამაგნიტების დენში მესამე ჰარმონიკი პრაქტიკულად არ არსებობს, რადგან მისთვის არ არის გამტარი კონტური. დამაგნიტების დენი შეიცავს მხოლოდ უნიშვნელო მესამე ჰარმონიკს, გაპირობებულს ფაზების მაგნიტური არასიმეტრიით. დამაგნიტების დენში მესამე ჰარმონიკის არარსებობის აუცილებელ შედეგს წარმოადგენს მაგნიტური ინ-



ნახ. 126. ინდუქციის მრუდის დაშლა უმლეს ჰარმონიკებად; 1— B ინდუქციის მრუდი; 2—ინდუქციის პირველი ჰარმონიკი; 3—ინდუქციის მესამე ჰარმონიკი.



ნახ. 127.

დუქციის (და ფაზური ე. მ. ძ-ის) მრუდში მესამე ჰარმონიკის წარმოშობა: მათ შორის ურთიერთ დამოკიდებულების გამო, რომელიც განისაზღვრება ფოლადის მაგნიტური მახასიათებლით.

ნახ. 125-ზე ნაჩვენებია მაგნიტური ინდუქციის მრუდის დამახინჯება იმ დაშვებით, რომ დამამაგნიტებელი დენი ახლოს არის სინუსოიდურთან.

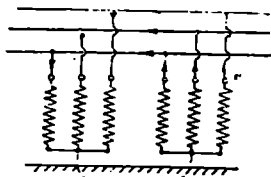
ნახ. 126-ზე ნაჩვენებია მაგნიტური ინდუქციის მრუდის დაშლა უმაღლეს ჰარმონიკებად სინუსოიდურ დამამაგნიტებელ დენის შემთხვევაში.

ფაზური ე. მ. ძ-ის მესამე ჰარმონიკი არ ახდენს გავლენას ხაზურ ე. მ. ძ-ზე, რადგან ყველა სამივე გრაჯნილში მესამე ჰარმონიკები ფაზით თანხედენილია. მიუხედავად ამისა ფაზურ ე. მ. ძ-ში მესამე ჰარმონიკის წარმოშობა არასასურველია. კერძოდ, მესამე ჰარმონიკი ზრდის რა ფაზურ ძაბვას, ელექტროლ ზემოქმედებას ახდენს ტრანსფორმატორის იზოლაციაზე ადაბლებს ამ უკანასკნელის სიმტკიცეს.

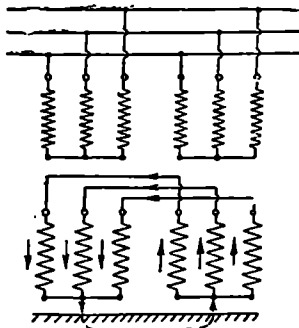
ორივე გრაჯნილის ვარსკვლავად შეერთება დიდი სიმძლავრის და მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორებში ჩვეულებრივად არ იხმარება.

მთელ რიგ შემთხვევებში მაინც არის ხოლმე სასურველი გრაჯნილების Y/Y_0 სქემით შეერთება, განსაკუთრებით ტრანსფორმატორებში, რომლებიც მუშაობენ განათების დატვირთვაზე, დ. ძ მხარზე, ფაზური ძაბვის გამოყენებისათვის. ასეთი ტრანსფორმატორების მ. ძ. მხარზე ვარსკვლავად შეერთება ხელსაყრელია წარმოების თვალსაზრისით (გრაჯნილს აქვს $\sqrt{3}$ ნაკლები ხვევი, ვიდრე სამკუთხედად შეერთების დროს). შეერთება Y/Y შეიძლება დაშვებულ იქნას, თუ შეიქმნება დამატებითი გამტარი კონტური დამამაგნიტებელი დენების მესამე ჰარმონიკისათვის. ასეთი კონტური შეიძლება შეიქმნას მაგ. ტრანსფორმატორის პირველადი გრაჯნილის და გენერატორის ნე-

იტრალური წერტილების შეერთებით, ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 127-ზე. ამ შემთხვევაში ნეიტრალურ გამტარში გვექნება მესამე ჰარმონიკის სამმაგი დამამაგნიტებელი დენი.¹ ტრანსფორმატორების პარალელური ძუშაობის შემთხვევაში მესამე ჰარმონიკის დენებისათვის გამტარი კონტური შეიძლება წარმოიშვას პარალელურად მომუშავე ტრანსფორმატორების გრაგნილების, ნეიტრალური წერტილების დამიწებისას. ტრანსფორმატორების განსხვავებული მახასიათებლის და განსაკუთრებით ვაგენთის განსხვავებული ხარისხის



ნახ. 128.



ნახ. 129. მესამე ჰარმონიკის დამამაგნიტებელი დენები, მეორადი გრაგნილების ნეიტრალური წერტილების დამიწების შემთხვევაში.

შემთხვევაში მესამე ჰარმონიკის დენი შეიკვრება ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 128-ზე.

იგივე ეფექტი მიიღება თუ გაცტარი კონტური მესამე ჰარმონიკის დენებისათვის შექმნილია ტრანსფორმატორის არა პირველად, არამედ მეორად მხარეზე. ასეთი კონტური წარმოიშევა მაგ. განსხვავებული მახასიათებლების მქონე პარალელურად მომუშავე ტრანსფორმატორების მეორადი გრაგნილების ნეიტრალების დამიწებისას (ნახ. 129). ასეთი კონტურის მოქმედება შეიძლება აიხსნას შემდეგნაირად. დაფუშვით, რომ დამამაგნიტებელ დენში მესამე ჰარმონიკის არსებობის გამო მაგნიტურ ნაკადში წარმოიშვა მესამე ჰარმონიკი. ეს უკანასკნელი გრაგნილებში დააინდუქტირებს იგივე პერიოდულობის ე. მ. ძ-ს. ეს ე. მ. ძ-ში ორივე ტრანსფორმატორში უნდა იყოს განსხვავებული რის გამო მეორადი გრაგნილების კონტურში აღიძვრება მესამე ჰარმონიკის დენი, რომელიც ნაწილობრივ უნდა აკომპენსირებდეს იმ ტრანსფორმატორის სამმაგი პერიოდულობის მაგნიტურ ნაკადს, სადაც ეს ნაკადი შეტია.

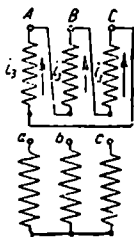
მესამე ჰარმონიკის დენებისათვის კონტურა წარმოიშევა აგრეთვე მეორადი გრაგნილის ნეიტრალის და დატვირთვის საშუალო წერტილის დამიწების დროს.

პირველადი გრაგნილის სამკუთხედად, ხოლო მეორადის — ვარსკვლავად შეერთების შემთხვევაში მესამე ჰარმონიკის დამამაგნიტებელი დენი შეიკვრება

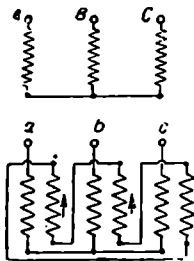
¹ ამ ხერხმა პრაქტიკაში გავრცელება ვერ ჰპოვა.

პირველადი გრაგნილის კონტურში, რადგან მესამე ჰარმონიკის დენი სამივე ფაზაში ერთნაირადაა მიმართული (ნახ. 130). იგივე ეფექტი მიიღება თუ ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილი შეერთებული იქნება ვარსკვლავად, მეორადი კი, სამკუთხედად, რადგან სამმაგი სიხშირის ე. მ. ძ. აღიძვრება, როგორც პირველად ისე მეორად გრაგნილებში.

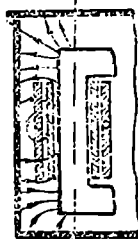
დასასრულ შეიძლება ვაჩვენოთ მაგნიტური ნაკადის და ფაზური ე. მ. ძ-ის შესამე ჰარმონიკის მოსპობის კიდევ ერთი ხერხი Y/Y —შეერთების დროს.



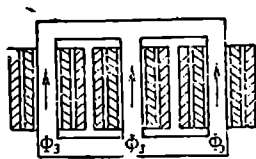
ნახ. 130. მესამე ჰარმონიკის დამამაგნიტებელი დენი სამკუთხედად შეერთებული გრაგნილის შემთხვევაში.



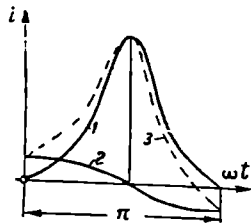
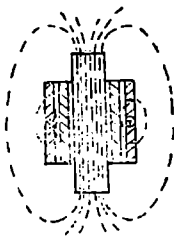
ნახ. 131. სამკუთხედად შეერთებული დამატებითი გრაგნილი, ძირითადი გრაგნილების Y/Y —სქემით შეერთების შემთხვევაში.



ნახ. 133. სამმაგი სიხშირის არეს ინდუქციური ხაზების ჩაკეტვა აუზის კედლების საშუალებით.



ნახ. 132. სამმაგი სიხშირის არეს ინდუქციური ხაზები სამფაზა ტრანსფორმატორში.



ნახ. 134. უკმი სვლის დენის აქტიური მდგენელის გავლენა. 1—უკმი სვლის დენის რეაქტიული მდგენელი— i_r ; 2—უკმი სვლის დენის აქტიური მდგენელი— i_a ; 3—უკმი სვლის დენი— i_s .

ეს ხერხი გამოიხატება სამკუთხედად შეერთებულ დამატებითი გრაგნილის მოწყობაში (ნახ. 131). ძირითადი სიხშირის ე. მ. ძ-ის ჯამი მასში ტოლი იქნება ნულის და პირველი ჰარმონიკის დენი არ წარმოიშვება. მესამე ჰარმონიკის დენებისათვის კი გრაგნილი წარმოადგენს მოკლედ შერთულს. ამ

გრაგნილის მოქმედება მეორადი გრაგნილის მოქმედების ეკვივალენტურია, გრაგნილების ვარსკვლავი—სამკუთხედზე შეერთების შემთხვევაში.

გ) კონსტრუქციის გავლენა. მესამე ჰარმონიკის გამოძევალება დამოკიდებულია ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის კონსტრუქციაზე. სამუშაო სამღეროვან ტრანსფორმატორში სამმაგი სიხშირის არეს ინდუქციური ხაზები არ გადის სამუშაო მაგნიტური სისტემის ვარსკვლავად შემაერთებელ უღლებში, რადგან ეს არე წარმოადგენს ერთფაზა არეს. ინდუქციური ხაზები იკვრება გარემო სივრცის საშუალებით ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 132-ზე დიდი მაგნიტური წინააღმდეგობის მქონე კონტურით. ამის გამო მესამე ჰარმონიკის მაგნიტური ნაკადი ღეროებში და ფაზური ე. მ. ძ. არის შედარებით მცირე და მცირედ ამახინჯებს ძაბვის მრუდის ფორმას. თუმცა ამ შემთხვევაში წარმოიშვება სხვა არასასურველი მოვლენები: სამმაგი სიხშირის არეს ინდუქციური ხაზები იკვრება რა გარშემო სივრცის საშუალებით, ნაწილობრივ გადის ავზის კედლებში და ტრანსფორმატორის სხვა ლითონის კონსტრუქციებში, რითაც იწვევს მათში გრივალურ დენებს (ნახ. 133). ამას მიეყვართ ტრანსფორმატორში ენერჯიის დანაკარგების გადიდებისთან და მისი გარემო ჰაერის მიმართ გადახურების გაზრდასთან.

იმ შემთხვევაში, როდესაც სამი ერთფაზა ტრანსფორმატორი შეერთებულია სამუშაო ჯგუფად, თვითფული ფაზის მაგნიტური სისტემა ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელია და ამიტომ სამმაგი სიხშირის არეს ინდუქციური ხაზები გადის იმავე გზით, რომელთაც ძირითადი არეს ხაზები. ამ შემთხვევაში მესამე ჰარმონიკის ე. მ. ძ. შეიძლება აღწეოდეს დიდ მნიშვნელობებს, განსაკუთრებით გაყვლითილ ტრანსფორმატორში.

ამ საკითხის პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს მალაღ ძაბვიან და მძლავრ ტრანსფორმატორებისათვის, რადგან ისინი ხშირად სრულდება სამუშაო ჯგუფად გაერთიანებულ ერთფაზა ერთეულების სახით, და ამავე დროს მათ აქვთ გაყვლითილი მაგნიტური სისტემა. მაგნიტურ ნაკადში მნიშვნელოვანი მესამე ჰარმონიკის წარმოშობის თავიდან აცილების მიზნით, ასეთ ტრანსფორმატორებში, როგორც წესი, ერთ-ერთი გრაგნილი შეერთებულია სამკუთხედად.

დ) უქმი სვლის დენის აქტიური მდგენელის გავლენა. ტრანსფორმატორის დამაგნიტების საკითხის გამორკვევისას, ჩვენ აქამდე მხედველობაში არ ვიღებდით უქმი სვლის დენის აქტიურ მდგენელს. დამაგნიტების პროცესი დაკავშირებულია ენერჯიის დანაკარგებთან უმთავრესად ფოლადის გულანის გადამაგნიტებაზე და უმნიშვნელო ჯოლოს თბურ დანაკარგებთან ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილში. ეს, როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები, იწვევს უქმი სვლის დენში აქტიური მდგენელის წარმოშობას, რომელიც 90°-ით არის დაძრული დამაგნიტებელ მდგენელის მიმართ.

აქტიურ მდგენელს, როგორც ეს სჩანს ნახ. 134-დან, შეაქვს დამატებითი დამახინჯება უქმი სვლის დენის მრუდში.

ე) პროცესები ტრანსფორმატორის ჩართვის დროს. უქმი სვლის დენი ჩვეულებრივად არ არის დიდი და მხოლოდ ძალიან მცირე ტრანსფორმატო-

რებში აკარბებს ნომინალური დენის 10%. მაგრამ, ტრანსფორმატორის ძაბვაზე მიერთებისას წარმოიშვება გარდამავალი პროცესები, რომლის დროს დამამაგნიტებელი დენი შეიძლება მკვეთრად გაიზარდოს.

გავარჩიოთ ტრანსფორმატორის ჩართვის შემთხვევა, როდესაც მისი გრაგნილი გათიშულია. მოვლენის ფიზიკური მხარის ახსნისათვის მივმართოთ ნახ. 135-ზე მოცემულ დიაგრამას. თუ უგულვებელყოფთ ტრანსფორმატორში ძაბვის ვარდნას, მაშინ Φ' მთავარი ნაკადის მიერ გრაგნილში დაინდუქტირებული ე. მ. ძ. E , დროის ყოველ მომენტში, და კერძოდ, ჩართვისას მოდებული u ძაბვის ტოლი და საწინააღმდეგოა. Φ' ნაკადი 90° -ით წინ უსწრებს E ე. მ. ძ-ს; ჩართვის დროს მას უნდა ჰქონდეს რაღაც საწყისი $\Phi'_{\text{ჩართ}}$ მნიშვნელობა. მაგრამ ჩართვის მომენტში (როდესაც გულანაში ნარჩი ნაკადი არ არსებობს), ნაკადი ტოლია ნულის და მაგნიტური არეს ინერციის გამო მას არ შეუძლია მყისად მიიღოს $\Phi'_{\text{ჩართ}}$ მნიშვნელობა, ამიტომ ჩართვის მომენტში Φ' ნაკადის გარდა წარმოიშვება დამატებითი, თავისუფალი, ნაკადი $\Phi_{\text{ფა}}$ — $\Phi'_{\text{ჩართ}}$. თავისუფალი ნაკადი ქრება თანდათან. რეზულტიური ნაკადი, ორი ნაკადის — იძულებითი და თავისუფალი ნაკადების ალგებრული ჯამის ტოლია. როგორც ნახ. 135-დან ჩანს, ჩართვის პროცესში რეზულტიური Φ ნაკადს შეუძლია მნიშვნელოვნად გადააქარბოს ნორმალურ Φ' ნაკადს. ამასთან ტრანსფორმატორის გაელენთის გამო ძალზე უნდა გაიზარდოს დამამაგნიტებელი დენი.

მოვლენის რაოდენობრივი შეფასებისათვის გამოვიღოთ ე. მ. ძ-ის წონასწორობის კანონიდან.

$$u_1 = i_1 r_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (10,2)$$

ამოცანა უფრო ადვილად გადაწყდება გიუქლენთავ მაგნიტურ სისტემის მქონე ტრანსფორმატორის შემთხვევაში, რადგან ამ დროს დამამაგნიტებელ დენსა და მაგნიტურ ნაკადს შორის არსებობს სწორხაზოვანი დამოკიდებულება, სახელდობრ:

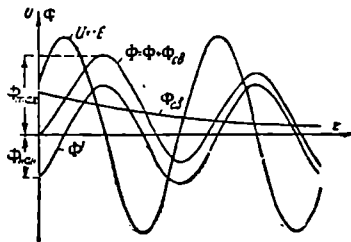
$$i_1 = \frac{w_1 \Phi}{L_1} \quad (10,3)$$

სადაც L_1 — ტრანსფორმატორის ინდუქტიობაა.

თუ (10,2) განტოლებაში ჩავსვათ (10,3) და დავეუშვებთ რომ მოდებული ძაბვა სინუსოიდურია, მივიღებთ

$$\frac{r_1}{L_1} \Phi + \frac{d\Phi}{dt} = \frac{u_1}{w_1} = \frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \psi) \quad (10,4)$$

სადაც ψ — ფაზური კუთხეა, რომელიც განსაზღვრავს ტრანსფორმატორის ჩართვის მომენტში სინუსოიდური ძაბვის მყისა მნიშვნელობას.



ნახ. 135. მაგნიტური ნაკადების დიაგრამა ტრანსფორმატორის ჩართვის დროს.

(10,4) განტოლების ამოხსნა შეიძლება წარმოდგენილ იქნას ორი მდგე-
ნელის სახით:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'', \quad (10,5)$$

სადაც Φ' —დამყარებული ნაკადის მუისა მნიშვნელობაა, ხოლო Φ'' —გარდა-
მავალი ანუ თავისუფალი ნაკადის მუისა მნიშვნელობა.

დამყარებული Φ' ნაკადი ტოლია:

$$\Phi' = \Phi_m \sin \left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2} \right) = -\Phi_m \cos (\omega t + \psi). \quad (10,6)$$

გარდამავალი Φ'' ნაკადის მნიშვნელობა განისაზღვრება განტოლებიდან:

$$\frac{d\Phi''}{dt} + \frac{r_1}{L_1} \Phi'' = 0. \quad (10,7)$$

ამ განტოლების კერძო ინტეგრალს აქვს სახე

$$\Phi'' = C e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \quad (10,8)$$

ინტეგრალის მუდმივა C განისაზღვრება საწყისი პირობებიდან. ჩართვის
მომენტში მაგნიტური ნაკადი ნულის ტოლია ან ტოლია ნარჩი მაგნიტური
ნაკადის, რომელსაც შეიძლება ჰქონდეს ნებისმიერი ნიშანი ნარჩი არეს მი-
პართულებისაგან დამოკიდებულად, ამიტომ ზოგად შემთხვევაში როცა $t=0$
უნდა არსებობდეს პირობა:

$$\Phi' + \Phi'' = -\Phi_m \cos \psi + C = \pm \Phi_{0em}, \quad (10,9)$$

საიდანაც

$$C = \Phi_m \cos \psi \pm \Phi_{0em}$$

და

$$\Phi'' = (\Phi_m \cos \psi \pm \Phi_{0em}) e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \quad (10,10)$$

(10,4)-ში, (10,6), (10,10) განტოლებების ჩასმით ვღებულობთ:

$$\Phi = \Phi_m \left[\cos \psi e^{-\frac{r_1}{L_1} t} - \cos (\omega t + \psi) \right] \pm \Phi_{0em} e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \quad (10,11)$$

ჩართვის ყველაზე უფრო ხელსაყრელი პირობები იქნება მაშინ, როდე-
საც $\psi = \frac{\pi}{2}$ და $\Phi_{0em} = 0$. ამ შემთხვევაში

$$\Phi = -\Phi_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \Phi_m \sin \omega t, \quad (10,12)$$

ე. ი. პირველი მომენტიდანვე გულანაში მყარდება ნორმალური ნაკადი.

ჩართვის ყველაზე უარესი პირობები იქნება მაშინ, თუ ჩართვა წარმოებს იმ მომენტში, როდესაც $\psi=0$ და ნაკადი Φ_{ocm} საწინააღმდეგოა Φ' ნაკადის. ამ შემთხვევაში

$$\Phi = \Phi_m \left(e^{-\frac{r_1 t}{L_1}} - \cos \omega t \right) + \Phi_{ocm} e^{-\frac{r_1 t}{L_1}} \quad (10,13)$$

Φ ნაკადი მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს ჩართვის მომენტიდან დაახლოებით ნახევარი პერიოდის შემდეგ ე. ი., როდესაც $\omega t \approx \pi$. ამ მომენტში ნაკადი ტოლია:

$$\Phi_{max} \approx \Phi_m \left(1 + e^{-\frac{r_1 \pi}{\omega L_1}} \right) + \Phi_{ocm} e^{-\frac{r_1 \pi}{\omega L_1}} \quad (10,14)$$

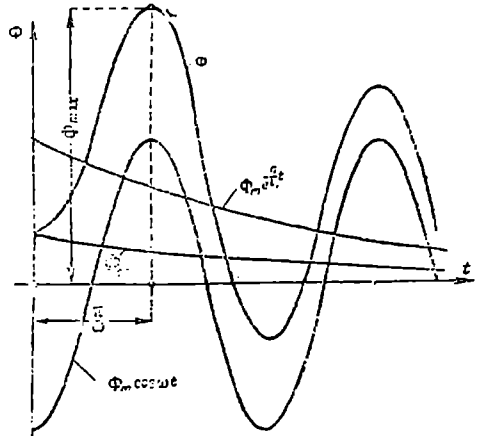
ჩვეულებრივად $r_1 \ll \omega L_1$ და პირველი მიახლოებით შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ გამოსახვა $e^{-\frac{r_1 t}{\omega L_1}}$ მცირედ განსხვავდება ერთისაგან, განსაკუთრებით დიდ ტრანსფორმატორებში. ნარჩი მაგნიტური ნაკადი კი Φ_{ocm} შეიძლება იყოს ძალზე დიდი მნიშვნელობის და ცალკეულ შემთხვევებში მიაღწიოს ნორმალურ ნაკადის მნიშვნელობის ნახევარს. ჩავთვლით რა, რომ $e^{-\frac{r_1 t}{\omega L_1}} \approx 1$

და $\Phi_{ocm} \approx -\frac{\Phi_m}{2}$, მივიღებთ: $\Phi \approx 2,5\Phi_m$.

ნაკადის (და დამამაგნიტებელი დენის) სიდიდე შეიზღუდება r_1 აქტიური წინააღმდეგობით, რომლის გადიდებით იზრდება გარდამავალი მდგენელის ქრობის სისწრაფე. ამიტომ r_1 -ს გადიდების მიზნით ჩართვის დროის განმეფლობაში ზოგჯერ შეჰყავთ დამატებითი დამცავი წინააღმდეგობები.

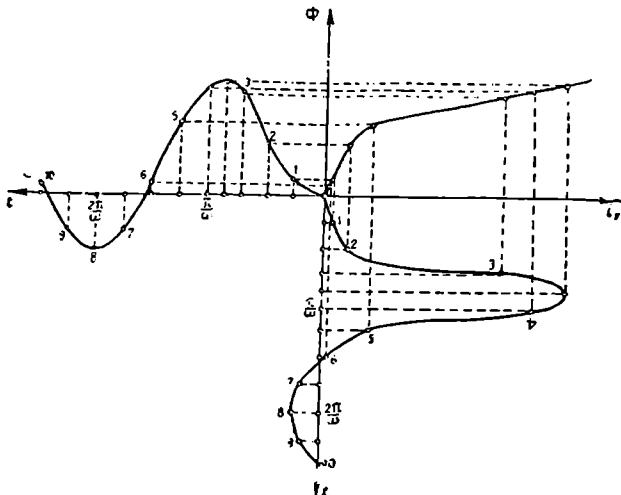
ნახ. 136-ზე ნაჩვენებია ჩართვის დროს რეზულტიური მაგნიტური ნაკადის და მისი ცალკეული მდგენელების ცვლილების დიაგრამები. გაუქმნთავე ტრანსფორმატორში ასევე იცვლება დამამაგნიტებელი დენიც.

გაუქმნითი ტრანსფორმატორის შემთხვევაში (10,2) განტოლების ზუსტი ამოხსნის მოცემა შეუძლებელია, ამ შემთხვევაში (10,3) შეიძლება განხი-



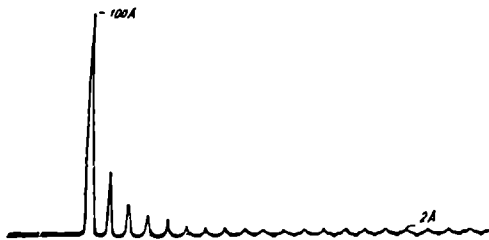
ნახ. 136. მაგნიტური ნაკადების ტეფადობის დიაგრამა ტრანსფორმატორის ჩართვის დროს ნარჩი ნაკადის აღრიცხვით.

ლულ იქნას, მხოლოდ როგორც მიახლოებითი და მასში L_1 -ის მნიშვნელობა შეესაბამება გულანის ძალზე გაყვნილ მდგომარეობას.



ნახ. 137. ჩართვის დენის გრაფიკული განსაზღვრა მაგნიტური მახასიათებლის საშუალებით.

ვსარგებლობთ რა (10.11) განტოლებით, მუგნიტური მახასიათებლის საშუალებით შეგვიძლია ვადავიდეთ მაგნიტური ნაკადის მყისა მნიშვნელობებიდან, დენის მყისა მნიშვნელობებზე, ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 137-ზე $\Phi_{\text{გომ}} = 0$ შემთხვევის.



ნახ. 138.

როგორც ცდიდან ჩანს, გაყვნილი ტრანსფორმატორის ჩართვის დროს, ჩართვის დენის ნახტომმა შეიძლება ასჯერ და მეტჯერ გადააპარბოს დამამაგნიტებელი დენის ნორმალურ მნიშვნელობას.

ნახ. 138-ზე მოყვანილია გაყვნილი ტრანსფორმატორის ჩართვის დენის ტიპური ოსცილოგრამა.

ჩართვის პროცესი სამფაზა ტრანსფორმატორის ცალკეულ ფაზებში მიმდინარეობს განსხვავებულად, რადგან ფაზების მაგნიტური ნაკადები დაძრულია ურთიერთ შორის 120° -ით.

ექსპლოატაციის პირობებში ტრანსფორმატორის ჩართვის დენების აღრიცხვა გეხდება უმათერესად დაცვის აპარატურის რეგულირების დროს ზეთიანი ამომრთველების არა სწორი გამორთვების თავიდან აცილების მიზნით, რომლებიც გამოწვეულია ჩართვის დენებით. გარკვეულ საფრთხეს წარმოადგენს აგრეთვე ურთიერთმიზიდვის ელექტრომაგნიტური ძალები, რომლებიც წარმოიშობა ჩართვის დენების შემთხვევაში პირველად გრაგნილის ხვევებს შორის.

11. ტრანსფორმატორის პარამეტრების განსაზღვრა განმარტობის გზით

II ნაწილის § 8. ვ) და ზ)-ში განხილული იყო ტრანსფორმატორის უმნიშვნელოვანესი პარამეტრების ცდის საშუალებით განსაზღვრის ხერხები. ამ პარამეტრებს ეკუთვნის: ა) დამამაგნიტებელი დენი I_0 და მისი აქტიური და რეაქტიული მდგენელები I_a და I_r , აგრეთვე მათთან დაკავშირებული უქმი სვლის წინააღმდეგობები (წინააღმდეგობები უქმი სვლის დროს)— r_{12} , x_{12} და Z_{12} ბ) მოკლედ ჩართვის ძაბვა E_2 და მისი აქტიური და რეაქტიული მდგენელები E_a და E_r , აგრეთვე მათი შესაბამისი მოკლედ ჩართვის წინააღმდეგობები Z_2 , r_2 და x_2 .

აღნიშნული პარამეტრებით განისაზღვრება ტრანსფორმატორის ძირითადი მუშა თვისებები, ამიტომ დიდი მნიშვნელობა აქვს ამ სიდიდეების განგარიშების შესაძლებლობას ტრანსფორმატორების პროექტირების დროს.

ა) უქმი სვლის პარამეტრები. როგორც ზემოთ იყო დადგენილი დამამაგნიტებელი დენი I_0 , მოცემული პირველადი ძაბვის დროს მცირედ განსხვავდება I_{10} უქმი სვლის დენისაგან, თუ დატვირთვა, რომლისთვისაც განსაზღვრულია I_0 დენი არ აღემატება ნომინალურს.

დამამაგნიტებელი დენის აქტიური მდგენელი I_a დაკავშირებულია უქმი სვლის დანაკარგებთან $P_0 \approx P_{12}$. ამიტომ I_a დენის განსაზღვრისათვის წინასწარ უნდა განისაზღვროს P_0 დანაკარგები.

უქმი სვლის დანაკარგები პრაქტიკულად შეგვიძლია ჩავთვალოთ მთლიანად ფოლადის გულანაში თავმოყრილად. ჯოჯის დანაკარგები პირველად გრაგნილში უქმი სვლის დროს, იპდენად უმნიშვნელოა, რომ ის შეგვიძლია მხედველობაში არ მივიღოთ. მაგ. თუ უქმი სვლის დენი შეადგენს ნომინალურის 5%, მაშინ ჯოჯის დანაკარგები პირველად გრაგნილში შეადგენს

$$\text{ნომინალური დენის დროს დანაკარგების } \left(\frac{5}{100} \right)^2 = 0,25\%$$

დანაკარგები გულანაში დაიყოფა დანაკარგებად ჰისტერეზისზე P_h და დანაკარგებად გრიგალურ დენებზე P_{gh} . P_h დანაკარგები დაკავშირებულია ჰისტერეზისის მოვლენასთან ვადამაგნიტების პროცესში. ვადამაგნიტების დროს დახარჯული ენერგია არ ექვემდებარება ზუსტ აღრიცხვას. მაგრამ პრაქტიკაში შემუშავებულია ემპირიული ფორმულები, რომლებიც იძლევა საკმაოდ კარგ თანხედენას ცდის მონაცემებთან. თანამედროვე ტრანსფორმატორებში, როგორც წესი ინდუქცია იმყოფება ზღვრებში $10\ 000 \div 16\ 000$ Gz.

ინდუქციის ამ მნიშვნელობების დროს ხვედრითი დანაკარგები ჰისტერეზისზე შეიძლება განსაზღვრულ იქნას რ. რიხტერის ფორმულით:

$$P_e = k_e \frac{f}{100} (B \cdot 10^{-4})^2 W/kg. \quad (11,1)$$

ამ ფორმულაში ინდუქციის ამპლიტუდური მნიშვნელობა B გამოსახულია ჰაუსებში ისე, როგორც ეს პრაქტიკაშია მიღებული.

k_e კოეფიციენტი დამოკიდებულია ფოლადის ხარისხზე და მისი შექანიკური დაქუჩავების წესზე და იმყოფება ზღვრებში $2,4 \div 3$. გრიგალურ დენებით გამოწვეული დანაკარგები ჩვეულებრივად განისაზღვრება ფორმულით:

$$P_{ფ} = k_{ფ} \left(\frac{f}{100} \cdot B \cdot 10^{-4} \right)^2 W/kg. \quad (11,2)$$

$k_{ფ}$ კოეფიციენტი დამოკიდებულია სატრანსფორმატორო ფოლადის ხარისხზე და მის სისქეზე. ტრანსფორმატორთმშენებლობაში ჩვეულებრივად იხმარება ფურცლოვანი ფოლადი, სისქით — $\delta = 0,35 \text{ mm}$ ან $\delta = 0,5 \text{ mm}$, როდესაც $\delta = 0,35 \text{ mm}$, $k_{ფ}$ კოეფიციენტი დაახლოებით ტოლია 0,6; ხოლო, როდესაც $\delta = 0,5 \text{ mm}$, $k_{ფ} \approx 1 \div 1,2$.

ჯამური დანაკარგები 1 კგ ფოლადში ტოლია:

$$P_e \approx P_e + P_{ფ} = \left\{ \frac{f}{100} (B \cdot 10^{-4})^2 \left(k_e + k_{ფ} \frac{f}{100} \right) \right\} W/kg^1. \quad (11,3)$$

50 Hz სიხშირის დროს ძირითადს წარმოადგენს დანაკარგები ჰისტერეზისზე, ისინი გრიგალისებურ დენების მიერ გამოწვეულ დანაკარგებზე დაახლოებით 5—8-ჯერ მეტია.

ვიციტ რა სატრანსფორმატორო ფოლადში P_e ხვედრითი დანაკარგები ადვილად შეგვიძლია განვსაზღვროთ დამამაგნიტებელი დენის აქტიური მდგენელი, თუ ვისარგებლებთ გამოსახულებით

$$I_a = \frac{\sum p_c G_c}{m U_{ფ}} \approx \frac{P_e}{m U_{ფ}} A, \quad (11,4)$$

სადაც G_c —გულანას ცალკეული ნაწილების წონაა, m —ფაზათა რიცხვია, $U_{ფ}$ —ფაზური ძაბვაა.

პრაქტიკული გაანგარიშების დროს სარგებლობენ მოცემულ ხარისხის ფოლადისათვის მიღებული ცხრილებით ან მრუდებით, რომლებიც გამოხატავენ ფოლადში ხვედრითი დანაკარგების დამოკიდებულებას ინდუქციისაგან. ასეთი მრუდები მოყვანილია ნახ. 139-ზე.

დამამაგნიტებელი დენის I_r რეაქტიული მდგენელის განსაზღვრის დროს

¹ სიდიდე $\frac{f}{100} \left(k_e + k_{ფ} \frac{f}{100} \right)$ დაახლოებით პროპორციულია $f^1,3$, ამიტომ ფოლადში დანაკარგების გაანგარიშებისათვის (11,3)-ს, ნაცლად შეიძლება ვისარგებლოთ ფორმულით (26,16).

ჩვეულებრივად სარგებლობენ იგივე მეთოდით, როგორც I_a ს განსაზღვრისას. I_a დენის ანალოგიურად, დენი I_r შეიძლება გამოვსახოთ შემდეგნაირად:

$$I_r = f(B) = \frac{P_r}{m U_{\phi}}, \quad (11,5)$$

სადაც P_r — რეაქტიული დამამაგნიტებელი სიმძლავრეა, გამოხატული ვოლტ-ამპერებში.

ნახ. 140-ზე სქემატურად გამოსახულია სამფაზა ტრანსფორმატორის მაგნიტური წრედი. იგი სამი სხვადასხვა უბნისაგან შედგება: ღეროებისაგან (a) უღლებისაგან (b) და საპაერო ღრეჩოებისაგან (c). ღეროების და უღლების დამამაგნიტებზე დახარჯული სიმძლავრე (P_{rc} და P_{rx}), შეიძლება გამოიხატოს ხვედრითი დამამაგნიტებელი სიმძლავრის და წონის საშუალებით შემდეგნაირად:

$$P_{rc} = p_{rc} G_r V_A; \quad P_{rx} = p_{rx} G_H V_A.$$

საპაერო ღრეჩოებში მაგნიტური არეს შექმნაზე დახარჯული სიმძლავრე პროპორციულია ღრეჩოების მოცულობის. თუ საპაერო ღრეჩოს სიგანე ტოლია δ , S_c ღეროს კვეთია და n ღრეჩოების რიცხვი, მაშინ საპაერო ღრეჩოების მოცულობა ტოლია $V_c = S_c \delta n \text{ cm}^3$.

საპაერო ღრეჩოების დამამაგნიტებელი სიმძლავრის განსაზღვრისას უნდა ვიკოდეთ. ხვედრითი დამამაგნიტებელი სიმძლავრე $p_x V_A / \text{cm}^3$. მაშინ საპაერო ღრეჩოებში მაგნიტური არეს შექმნაზე დახარჯული სიმძლავრე ტოლი იქნება:

$$P_{rx} = p_x S_c n \delta.$$

დაშიხტულ უღლებიან ტრანსფორმატორებში მთლიანი საპაერო შალედები არ არის. ამ შემთხვევაში δ -ს ქვეშ უნდა ვივულისხმოთ დაშიხტის ადგილას ნამდვილი ღრეჩოების ერთობლიობის ეკვივალენტურა, პირობითი მთლიანი ღრეჩო. ამ ღრეჩოს სიგანე შეიძლება მიღებულ იქნას ტოლი

$$\delta = 0,0035 \text{ cm.}$$

მთლიანი დამამაგნიტებელი სიმძლავრისათვის გვექნება:

$$P_r = p_{rc} G_c + p_{rx} G_H + p_x S_c n \delta. \quad (11,6)$$

ნახ. 141-ზე მოყვანილია ხვედრითი დამამაგნიტებელი სიმძლავრის მრუდები ტრანსფორმატორული ფოლადისათვის და საპაერო ღრეჩოებისათვის. სრული დამამაგნიტებელი დენი ტოლია.

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \approx I_{10}. \quad (11,7)$$

დამახასიათებელ სიდიდეს წარმოადგენს უქმი სელის დენის პროცენტული მნიშვნელობა $\frac{I_{10}}{I_H} \cdot 100\%$. იგი ჩვეულებრივად ძვეს ზღვრებში $2 \div 10\%$ ამასთან ზედა ზღვარი ეკუთვნის მცირე სიმძლავრის ტრანსფორმატორებს.

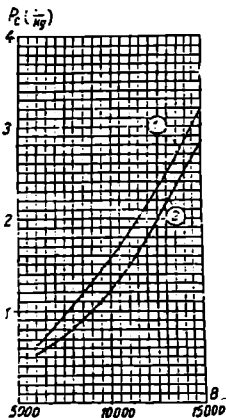
რაც უფრო მცირეა უქმი სელის დენის პროცენტული მნიშვნელობა, მით უფრო ხელსაყრელი პირობებია ტრანსფორმატორის ექსპლოატაციისათვის, ქსელის რეაქტიული დატვირთვის შემცირების თვალსაზრისით.

უქმი სელის დენის და P_0 დანაკარგების მნიშვნელობების მიხედვით (8,46)–(8,49) ფორმულებით განისაზღვრება უქმი სელის წინააღმდეგობები.

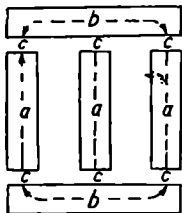
ბ) მოკლედ შერთვის პარამეტრები. მოკლედ შერთვის ძაბვის $e_k\%$ -ის განსაზღვრისათვის ცალ-ცალკე განსაზღვრავენ მის აქტიურ და რეაქტიულ წაგენელებს.

$$(8,57)\text{-ის თანახმად } e_a = \frac{I_H r_{\kappa}}{U_H} 100\%.$$

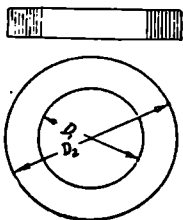
r_{κ} წინააღმდეგობის განსაზღვრისათვის წინასწარ უნდა ვიპოვოთ თვითეული-



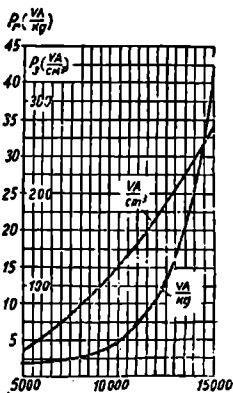
ნახ. 139. ხვედრითი დანაკარგების დამოკიდებულება ინდუქციისაგან სატრანსფორმატორო ფოლადში. $f=50$ Hz
1— $\rho=0,5$ mm; 2— $\rho=0,35$ mm



ნახ. 140.



ნახ. 142.



ნახ. 141. ხვედრითი დანაკარგების სიმძლავრის დამოკიდებულება ინდუქციისაგან სატრანსფორმატორო ფოლადისა და საჭერო ღრეჩებისათვის.

გრაგნილის აქტიური წინააღმდეგობა. გრაგნილის წინააღმდეგობა მუდმივი დენისათვის

$$r = \rho \frac{l}{S}, \quad (11,8)$$

სადაც ρ გამტარის ხვედრითი წინააღმდეგობაა, S —მისი კვეთი, l —გრაგნილის გაშლილი სიგრძე.

ნახ. 142-ზე სქემატურად გამოსახულია ერთი კოჭა. როგორც ამ ნახა-

ზიდან ჩანს $i = \pi D_{ep} w$, სადაც w ხევეთა რიცხვია, $D_{ep} = \frac{D_1 + D_2}{2}$. ამ-

რიგად:

$$r = \frac{\pi D_{ep} w \rho}{s} \Omega. \quad (11,9)$$

გრაგნილის აქტიური წინააღმდეგობა მასში ცვლადი დენის გავლის დროს შეტი იქნება, ვიდრე r , გამტარის განიკვეთში დენის სიმკვრივის არათანაბარი განაწილების გამო. წინააღმდეგობის ეს გაზრდა შეიძლება აღირიცხოს რა-ღაც k კოეფიციენტით, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია გრაგნილის კონსტრუქციაზე და ფორმაზე, და სპილენძის კვეთზე. ჩვეულებრივად k იმყოფება ზღვრებში $1.05 \div 1.2^1$. ამრიგად

$$r_a = \frac{k \pi D_{ep} w \rho}{s} \Omega,$$

და (8,54) განტოლებიდან

$$r_t \approx r_1 + r_2' = k \pi w l \rho \left(\frac{D_{1ep}}{s_1} + \frac{D_{2ep} k_{12}}{s_2} \right). \quad (11,10)$$

აქედან, ვიცით რა დენის და ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობები (8,57)-ს მიხედვით აღვიღად განისაზღვრება e_u .

OCT 2524-ს მიხედვით ტრანსფორმატორის მოკლედ შერთვის ძაბვა უნდა იქნეს მოყვანილი $75^\circ C$ ტემპერატურასთან, ამიტომ სპილენძის გრაგნილებისათვის ხვედრითი წინააღმდეგობა ρ მიიღება ტოლი $\sim 21 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot mm^2/m$

პრაქტიკული ანგარიშის დროს ხშირად მოსახერხებელია განისაზღვროს დანაკარგები და გრაგნილის აქტიური წინააღმდეგობა სპილენძის წონის G_u და დენის სიმკვრივის Δ -ს საშუალებით;

$$P_r = \Delta^2 s^2 \cdot \rho \frac{l}{s} = \Delta^2 \rho s,$$

სადაც $s = s_l$ — გამტარის მოცულობაა.

თუ მოცულობას გამოვსახავთ გამტარის წონის და γ_u ხვედრითი წონის საშუალებით, მივიღებთ:

$$P_r = \Delta^2 \rho \frac{G_u}{\gamma_u} \approx 2,4 \Delta^2 G_u.$$

აქ Δ გამოსახულია A/mm^2 -ში $G_u - kg$ -ბში, ხოლო ხვედრითი წინააღმდეგობა $\rho \approx 21 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot mm^2/m$ -ს შეესაბამება $75^\circ C$.

¹ k კოეფიციენტი თვითელი გრაგნილისათვის შეიძლება განისაზღვროს (26,12) და (26,13) ფორმულებით, თუ ჩავთვლით, რომ m — გრაგნილის გამტართა რიცხვია ფანტვის არეს მიმართულების პერპენდიკულარულ ფენაში, n — გამტარების რიცხვი ფანტვის არეს მიმართულებით, a — გრაგნილის სიგრძე ფანტვის არეს მიმართულებით, b — გამტარის ზომა ფანტვის არეს მიმართულებით, h — გამტარის ზომა ფანტვის არეს პერპენდიკულარული მიმართულებით. დისკოსებური გრაგნილების შემთხვევაში ანგარიში უნდა ჩატარდეს ერთი ჯგუფისათვის.

თუ დავუშვებთ, რომ კოეფიციენტი $k = 1,05$, მივიღებთ:

$$P r_a \approx 2,5 \Delta^2 G_M$$

და

$$r_a \approx \frac{2,5 \Delta^2 G_M}{I^2} \quad (11,11)$$

(8,57) ტოლობის თანახმად მოკლედ შერთვის ძაბვის რეაქტიული მდგენელი გამოისახება შემდეგნაირად:

$$\epsilon_r = \frac{I_H x_k}{U_H} \cdot 100 = \frac{I_H \omega L_k}{U_H} 100\%$$

რამდენადაც ყოველი აღებული ტრანსფორმატორისათვის ძაბვის და დენის ნომინალური მნიშვნელობები წარმოადგენს წინასწარ განსაზღვრულ სიდადეგს, მოკლედ შერთვის ძაბვის რეაქტიული მდგენელის განსაზღვრისათვის საკმარისია მოკლედ შერთვის L_k ინდუქტიობის გამოთვლა.

ტრანსფორმატორის L_k ინდუქტიობა მოკლედ შერთვისას წარმოადგენს ფანტეის ინდუქტიობას, ამიტომ L_k შეიძლება განესაზღვროთ ფანტეის მაგნიტური არეს ენერჯიის გამოსახულებიდან:

$$W = L_k \frac{i_k^2}{2} = \frac{1}{2} \int B H d v, \quad (11,12)$$

სადაც B და H —ფანტეის მაგნიტური არეს ინდუქცია და დამაბულობაა, v —ენტეგრობის მოცულობაა, i_k —დენი, რომელიც გადის გრაგნილში მოკლედ შერთვის ცდის დროს.

L_k სიდიდის განსაზღვრის ამოცანა გაადვილებულია იმით, რომ ფანტეის მაგნიტური არეს ინდუქციური ხაზები იკვრება უმთავრესად გულანას გარეშე ისე, როგორც ეს სქემატურად ნაჩვენებია ნახ. 143-ზე.

W ენერჯიის გამოთვლის დროს, გულანას შიგნით არე შეგვიძლია უგულვებელყოთ, რადგან არეს ამ ნაწილის ენერჯია ძალიან მცირეა ან თუ დავუშვებთ, რომ $\mu \approx \infty$, თითქმის ნულის ტოლიაა.

არამაგნიტური გარემოსათვის, დავუშვებთ რა $B = \mu_0 H$, (11,12) განტოლებიდან ვიპოვით:

$$L_k = \frac{\mu_0}{i_k^2} \int H^2 d v. \quad (11,13)$$

ამ გამოსახვიდან ჩანს, რომ L_k ინდუქტიობის განსაზღვრა დაიყვანება ფანტეის არეს ნებისმიერ წერტილში H დამაბულობის კვადრატის განსაზღვრამდე. ამ ამოცანის გამარტივებისათვის უშვებენ, რომ არეს დამაბულობის ვექტორი, გრაგნილის მთელი სიგრძის გასწვრივ მისი დერძის პარალელურია, ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 144-ზე. გრაგნილის გარეთ მოთავსებულ არეს შიახლოებით სთვლიან ნულის ტოლად. დენის სიმკვრივეს გრაგნილის

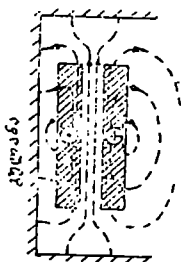
მთელ კვეთში თვლიან უცვლელად. ასეთი დაშვებისას ნახ. 144-ზე პუნქტური ნაჩვენები გზით, შემოვლის მაგნიტური ძაბვა ტოლია $Hl = i_k w$, საინდანაც

$$H = \frac{i_k w}{l}; \quad (11,14)$$

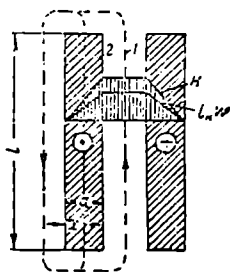
შემოვლის 2 გზის შესაბამისად მივიღებთ: $Hl = i_k \frac{w \cdot x}{a}$ და

$$H = \frac{i_k w}{l_a} x. \quad (11,15)$$

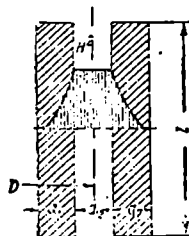
(11,15) ტოლობა გვიჩვენებს, რომ მიღებული დაშვების შემთხვევაში არეს დაძაბულობა გრაგნილის შიგნით იცვლება სწორხაზოვნად და განაწილებულია ტრაპეციოდურად.



ნახ. 143. ცილინდრული გრაგნილის ფანტის მაგნიტური არეს სქემატური გამოსახვა.



ნახ. 144. ცილინდრული გრაგნილის ფანტის არეს მიაზღობებითი განრიგება.



ნახ. 145.

ამ პირობებში H^2 -ის განაწილების დიაგრამას (ნახ. 145) ექნება პარაბოლური ტრაპეციის ხასიათი.

ამიტომ:

$$\int_v H^2 dv = H^2 \pi D l \left(a_{12} + \frac{a_1}{3} + \frac{a_2}{3} \right) \quad (11,16)$$

ან (11,14)-ს თანახმად:

$$\int_v H^2 dv = \frac{i_k^2 w^2 \pi D}{l} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right), \quad (11,17)$$

სადაც ყველა აღნიშვნა შეესაბამება ნახ. 145.

როგორც ფანტის არეს სივრცული განრიგების ზუსტი ანალიზი გვიჩ-

ვენებს არა მარტო გრაგნილების შიგნით, არამედ მათ გარეთაც, ინტეგრალის $\int_v H^2 dv$ (11,17) განტოლებით მოცემული მნიშვნელობა გამოდის რამ-

დენადმე გადამეტებული. ამ ინტეგრალის უფრო ზუსტი მნიშვნელობა შეიძლება მიღებულ იქნეს (11,17) განტოლებაში ვ. როგოვსკის მიერ მოცემულ k_R კოეფიციენტის შეტანით:

$$\int_v H^2 dv = \frac{i^2 w^2 \pi D}{l} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) k_R, \quad (11,18)$$

აქასთან

$$k_R = 1 - \sigma \left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma}} \right), \quad (11,19)$$

სადაც

$$\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi l}. \quad (11,20)$$

როდესაც $\sigma < 0,25$

$$k_R \approx 1 - \sigma. \quad (11,21)$$

(11,13) განტოლებაში (11,18)-ის ჩასმით ვლებულობთ საძიებელ სიდიდეებს:

$$L_K = \frac{\mu_0 w^2 \pi D}{l} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) k_R; \quad (11,22)$$

$$\kappa_K = \frac{7,92 f w^2 \pi D}{l} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) k_R 10^{-8} \Omega. \quad (11,23)$$

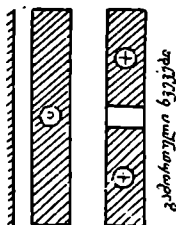
თუ (11,23) განტოლებაში ჩავსვამთ $w = w_1$, მაშინ წინააღმდეგობა x_K მიყვანილი იქნება პირველადი გრაგნილის ხვევთა რიცხვთან, ხოლო თუ $w = w_2$ — მეორადი გრაგნილის ხვევთა რიცხვთან.

ხშირად ტრანსფორმატორის ძაბვის რეგულირების აუცილებლობის გამო, გამოსთიშავენ მაღალი ან დაბალი ძაბვის გრაგნილის ხვევების ნაწილს. ჩვეულებრივად გამოსათიში ხვევები მოთავსებულია გრაგნილის შუა ნაწილში ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 146-ზე. ამ შემთხვევაში გრაგნილების ინდუქტიობა L_K რამდენადმე იზრდება. როდესაც ხვევების 10%-დგ გამორთულია, ინდუქტიობა L_K ჩვეულებრივად იზრდება არა უმეტეს 10%-სა. ტრანსფორმატორის დაფაზე ნაჩვენებია ძაბვის საშუალო საფეხურის შესაბამის მოკლედ შერთვის ძაბვა.

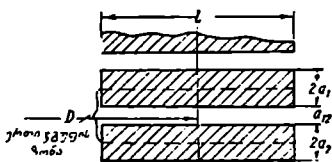
დისკოსებური გრაგნილების შემთხვევაში მოკლედ შერთვის ძაბვის აქტიური მდგენელის განსაზღვრა წარმოებს ზუსტად ისე, როგორც კონცენტრულ გრაგნილებისათვის. ზოგიერთ თავისებურებას წარმოადგენს k , რეაქტიული მდგენელის განსაზღვრა.

ნახ. 147-ზე წარმოდგენილია ეგრეთწოდებული სიმეტრიული დისკოსებური გრაგნილი. განაპირა კოქებს აქვს ხვევათა განახევრებული რიცხვი, ამი-

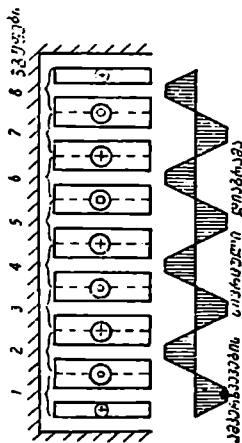
ტომ გრაგნილი შეიძლება იყოს დაყოფილი ზუსტად ერთნაირ წყვილ ჯგუფებად (ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია პუნქტირით), რომელთაგან ყოველი წყვილის ამპერხვევების ჯამი ტოლია ნულის.



ნახ. 146. ხვევების გამორთვა ძაბვის რეგულირების დროს.



ნახ. 148.



ნახ. 147.

ნახ. 147-ზე მოცემული ამპერხვევების სივრცული დიაგრამა გვიჩვენებს, რომ ყოველი წყვილი ჯგუფის ფანტის ინდუქტიობა ერთნაირია, ამიტომ მოკლედ შერთვის სრული ინდუქტიობის განსაზღვრისათვის საკმარისია განვსაზღვროთ იგი ერთი ჯგუფისათვის და გავამრავლოთ ჯგუფების რიცხვზე. ანგარიში წარმოებს ზუსტად ისე, როგორც კონცენტრული გრაგნილების შემთხვევაში.

თუ w ხვევისაგან შემდგარი გრაგნილი დაყოფილია n ჯგუფად, მაშინ ერთი ჯგუფის მოკლედ შერთვის ინდუქტიობა ტოლია:

$$L_k' = \frac{\mu_0 \left(\frac{w}{n}\right)^2 \pi D}{l} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}\right) k_R \quad (11,24)$$

სადაც ყველა აღნიშვნები შეესაბამება ნახ. 148-ს.

მთელი გრაგნილის მოკლედ შერთვის სრული ინდუქტიობა n -ჯერ მეტი იქნება:

$$L_k = L_k' \cdot n = \frac{\mu_0 w^2 \pi D}{n \cdot l} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}\right) k_R \quad (11,25)$$

(11,25) გამოსახვა გვიჩვენებს, რომ თუ შევარჩევთ ჯგუფების საკმაროდ დიდ რიცხვს n , სხვა ერთნაირი პირობების შემთხვევაში დისკოსებურ გრაგ-

ნილში შეიძლება მივიღოთ უფრო დაბალი მოკლედ შერთვის ძაბვა, ვიდრე კონცენტრულ გრაგნილში.

ზემოთ განხილულისაგან განსხვავებულ, სპეციალურ შემთხვევაში, გრაგნილების მოკლედ შერთვის ინდუქტიობის ანგარიში წარმოადგენს მნიშვნელოვან სიძნელეებს. ამიტომ ეს შემთხვევები აქ არ განიხილება.

ჩვენ აგრეთვე არ განვიხილავთ პირველად და მეორადი გრაგნილების ინდუქტიობის ცალ-ცალკე განსაზღვრას, ვინაიდან ამჟამად არ არის ამ ამოცანის გადაწყვეტის საიმედო მეთოდები.

12. მრავალგრაგნილიანი ტრანსფორმატორები

მრავალ შემთხვევაში, როდესაც საჭიროა ქვესადგურზე ერთდროულად გვექონდეს რამდენიმე ძაბვა, მიზანშეწონილია რამდენიმე ტრანსფორმატორის დაყენების ნაცვლად გამოყენებულ იქნეს მრავალგრაგნილიანი ტრანსფორმატორი, ე. ი. ტრანსფორმატორი, რომელსაც აქვს არა ერთი, არამედ განსხვავებული ძაბვის რამდენიმე მეორადი გრაგნილი. ამჟამად განსაკუთრებით ფართო პრაქტიკული გამოყენება ჰპოვა სამგრაგნილიანმა ტრანსფორმატორებმა.

ა) სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ძირითადი განტოლებები. სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის პრინციპული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 149-ზე. თუ გრაგნილი 1 მიერთებულია ცვლადი დენის წყაროსთან, ხოლო გრაგნილებთან 2 და 3 მიერთებულია დატვირთვები, მაშინ ორგრაგნილიან ტრანსფორმატორთან ანალოგიით თვითეული გრაგნილისათვის შეიძლება დავწეროთ ე. მ. ძ.-ბის შემდეგი განტოლებები:

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + i_1 r_1; \quad (12,1)$$

$$u_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} - M_{21} \frac{di_1}{dt} - M_{23} \frac{di_3}{dt} - i_2 r_2; \quad (12,2)$$

$$u_3 = -L_3 \frac{di_3}{dt} - M_{32} \frac{di_2}{dt} - M_{31} \frac{di_1}{dt} - i_3 r_3 \quad (12,3)$$

ან თუ ჩავეწერთ ვექტორული ფორმით:

$$\dot{U}_1 = j\omega(L_1 \dot{I}_1 + M_{12} \dot{I}_2 + M_{13} \dot{I}_3) + \dot{I}_1 r_1; \quad (12,4)$$

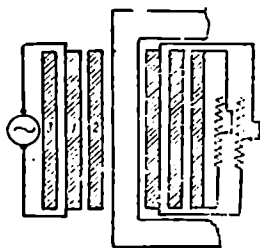
$$\dot{U}_2 = -j\omega(L_2 \dot{I}_2 + M_{21} \dot{I}_1 + M_{23} \dot{I}_3) - \dot{I}_2 r_2; \quad (12,5)$$

$$\dot{U}_3 = -j\omega(L_3 \dot{I}_3 + M_{32} \dot{I}_2 + M_{31} \dot{I}_1) - \dot{I}_3 r_3. \quad (12,6)$$

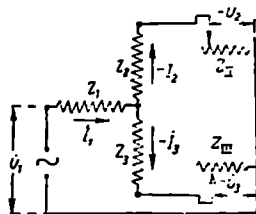
სიმარტივისათვის დავუშვათ, რომ ყველა სამი გრაგნილი მიყვანილია ხვევთა საერთო რიცხეთან, მაშინ უგულებელვყოფთ რა დამამაგნიტებელ დენს, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0. \quad (12,7)$$

მიღებული თანაფარდობები, იძლევა ტრანსფორმატორში ძაბვის ვარდნის განსაზღვრის საშუალებას, დატვირთვის დროს. 1—2 გრაგნილების წყვილში ძაბვის ვარდნის განსაზღვრისათვის საკიროა \dot{U}_1 ვექტორის გამოვსკლოთ: — \dot{U}_2 ვექტორი. ამ გამოვსკლების დროს (12,4) და (12,5)-დან (12,7)-ს საშუალებით გამოვსკრიცხოთ I_2 :



ნახ. 149. სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის პრინციპული სქემა.



ნახ. 150. სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის შენაცვლების სქემა.

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - (-\dot{U}_2) &= \dot{I}_1 [j\omega(L_1 - M_{12} - M_{21} + M_{23}) + r_1] - \\ &- \dot{I}_2 [j\omega(L_2 - M_{12} + M_{12} - M_{23}) + r_2] = \\ &= \dot{I}_1(r_1 + jx_1) - \dot{I}_2(r_2 + jx_2) = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 Z_2. \end{aligned} \quad (12,8)$$

განესაზღვრავთ რა ანალოგიურად, ძაბვის ვარდნას 1—3 გრაგნილების წყვილში და ამასთან გამოვსკრიცხოთ (12,4) და (12,6)-დან I_3 დენს შივილებით:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - (-\dot{U}_3) &= \dot{I}_1 [j\omega(L_1 - M_{12} - M_{13} + M_{32}) + r_1] - \\ &- \dot{I}_3 [j\omega(L_3 - M_{32} - M_{13} + M_{13}) + r_3] = \\ &= \dot{I}_1(r_1 + jx_1) - \dot{I}_3(r_3 + jx_3) = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_3 Z_3. \end{aligned} \quad (12,9)$$

ბ) სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის შენაცვლების სქემა. (12,8) და (12,9) ტოლობები შეიძლება შეთავსებულ იქნეს შემდეგი სახით:

$$\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_2) = -(\dot{U}_3 + \dot{I}_3 Z_3). \quad (12,10)$$

(12,7) და (12,10) ტოლობები გვიჩვენებს, რომ სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორისათვის არსებობს ნახ. 150-ზე გამოსახული მარტივი შენაცვლების სქემა. შევცვლით რა ამ სქემაში გარე წრედის Z_{II} და Z_{III} წინააღმდეგობებს შეგვიძლია გამოვიკვლიოთ სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის და მისი გრაგნილის ყოველი წყვილის მუშაობა ზღვრებში უკვე სვლიდან მოკლედ შეერთავდეთ.

გ) სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის პარამეტრები. (12,8) და (12,9) თანაფარდობანი გვიჩვენებს, რომ სამგრაგნილიან ტრანსფორმატორში ძაბვის ვარდნის რეაქტიული მდგენელი დამოკიდებულია არა მარტო საკუთარ ინდუქტიობისაგან და გრაგნილების განსახილველი წყვილის ურთიერთ ინდუქტიობისაგან, არამედ აგრეთვე თვითეული ამ გრაგნილის და შესამე გრაგნილის ურთიერთ ინდუქტიობისაგან.

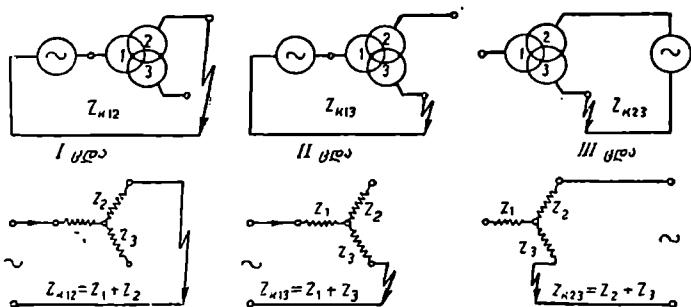
(12,8) და (12,9) განტოლებების ანალიზისათვის მივმართოთ ნახ. 151-ს, სადაც წარმოდგენილია მოკლედ შერთვის სამი ცდის სქემები. II ნაწილის § 9, ზ-ს შესაბამისად პირველ ცდაში მოკლედ შერთვის წინააღმდეგობა ტოლია:

$$x_{k12} = \omega[(L_1 - M_{12}) + (L_2 - M_{21})] = \omega(L_1 + L_2 - 2M_{12}) \quad (12,11)$$

და შესაბამისად მეორე და შესამე ცდებში

$$x_{k13} = \omega(L_1 + L_3 - 2M_{13}); \quad (12,12)$$

$$x_{k23} = \omega(L_2 + L_3 - 2M_{23}). \quad (12,13)$$



ნახ. 151. მოკლედ შერთვის სამი ცდის სქემა.

შევეკრიბოთ x_{k12} და x_{k13} და მათ ჯამს გამოვკალოთ x_{k23} , გვექნება რა ამ დროს მხედველობაში, რომ

$$M_{12} = M_{21}; \quad M_{13} = M_{31} \quad \text{და} \quad M_{23} = M_{32},$$

მივიღებთ:

$$x_{k12} + x_{k13} - x_{k23} = 2\omega(L_1 - M_{12} + M_{23} - M_{13})$$

ან, თუ შევადარებთ ამ გამოსახვას (12,8)-სთან ვიპოვიოთ:

$$\omega(L_1 - M_{12} + M_{23} - M_{13}) = \frac{x_{k12} + x_{k13} - x_{k23}}{2} = x_1. \quad (12,14)$$

x_2 და x_3 წინააღმდეგობებისათვის ანალოგიურად მიიღება გამოსახვები:

$$\omega(L_2 - M_{12} + M_{13} - M_{23}) = \frac{x_{k12} + x_{k23} - x_{k13}}{2} = x_2; \quad (12,15)$$

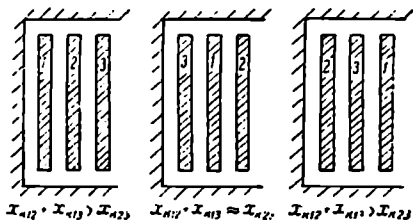
$$\omega(L_2 - M_{12} - M_{22} + M_{12}) = \frac{x_{k12} + x_{k22} - x_{k12}}{2} = x_2. \quad (12,16)$$

ამრიგად, ორგრაგნილიან ტრანსფორმატორისაგან, განსხვავებით, სადაც x_1 და x_2 წარმოადგენს მოცემული გრაგნილის ფანტვის ნამდვილ ინდუქტიურ წინააღმდეგობას, სამგრაგნილიან ტრანსფორმატორში x_1 , x_2 და x_3 წარმოადგენს მხოლოდ, ყველა სამი გრაგნილის თვით და ურთიერთ ინდუქტიუობისაგან დამოკიდებულ ერთგვარ ეკვივალენტურ ინდუქტიურ წინააღმდეგობებს.

ნახ. 152-ზე ნაჩვენებია პირველადი და მეორადი გრაგნილების კონცენტრული ურთიერთ განლაგების სამი ხერხი.

გრაგნილების ურთიერთ განლაგება არსებით გავლენას ახდენს x_1 , x_2 და x_3 წინააღმდეგობების ნიშნულზე.

როგორც ნახ. 152-დან ჩანს x_1 წინააღმდეგობა შეიძლება ახლოს იყოს ნულთან და ზოგჯერ უარყოფითიც კი, თუ გრაგნილი 1 მოთავსებულია 2 და 3 გრაგნილებს შორის. თუ გრაგნილი 1 — მოთავსებულია გარედან, x_1 წინააღმდეგობას ყოველთვის აქვს დადებითი მნიშვნელობა. იგივე სამართლიანია 2 და 3 გრაგნილებისათვისაც. მათი ორ დანარჩენ გრაგნილს შორის განლაგებისას x_2 და x_3 წინააღმდეგობები სათანადოდ იღებენ ნულთან ახლოს მნიშვნელობებს.



ნახ. 152.

(12,14) — (14,16) ტოლობებიდან გამომდინარეობს, რომ x_1 , x_2 და x_3 წინააღმდეგობები ადვილად შეიძლება განსაზღვრულ იქნეს ექსპერიმენტალური გზით. ამისათვის აუცილებელია შესრულებულ იქნას მოკლედ შერთვის სამი ცდა ნახ. 151-ზე მოყვანილ სქემების მიხედვით.

x_1 , x_2 და x_3 წინააღმდეგობების ანალოგიურად, მოკლედ შერთვის სამი ცდიდან შეიძლება განსაზღვრულ იქნეს r_1 , r_2 და r_3 წინააღმდეგობები:

$$\frac{r_{k12} + r_{k13} - r_{k23}}{2} = \frac{(r_1 + r_2) + (r_1 + r_3) - (r_2 + r_3)}{2} = r_1; \quad (12,17)$$

$$\frac{r_{k12} + r_{k23} - r_{k13}}{2} = \frac{(r_1 + r_2) + (r_2 + r_3) - (r_1 + r_3)}{2} = r_2; \quad (12,18)$$

$$\frac{r_{k13} + r_{k23} - r_{k12}}{2} = \frac{(r_1 + r_3) + (r_2 + r_3) - (r_1 + r_2)}{2} = r_3. \quad (12,19)$$

ამიტომ ცალკეული გრაგნილების სრული წინააღმდეგობებისათვისაც ნიილება გამოსახვები:

$$Z_1 = \frac{Z_{k12} + Z_{k13} - Z_{k23}}{2}; \quad (12,20)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{k12} + Z_{k23} - Z_{k13}}{2}; \quad (12,21)$$

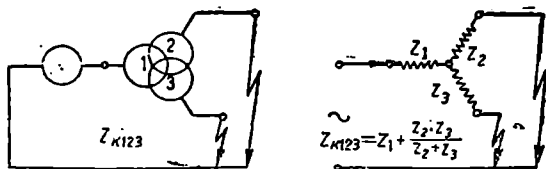
$$Z_3 = \frac{Z_{k13} + Z_{k23} - Z_{k12}}{2}. \quad (12,22)$$

ნახ. 151-ზე ნაჩვენებ მოკლედ შერთვის სამი ცდის გარდა, შესაძლოა კიდევ მეოთხე ცდა, ნახ. 153-ზე მოცემულ სქემის მიხედვით, სადაც ერთ-დროულად მოკლდება შერთული 2 და 3 გრაგნილები. ამ შემთხვევაში მოკლედ შერთვის სრული წინააღმდეგობა ტოლია:

$$Z_{k123} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}. \quad (12,23)$$

უკანასკნელი ცდით შეგვიძლია შევამოწმოთ პირველი სამი ცდის მონაცემები, ვინაიდან ისინი ვეაძლევინ Z_{k123} სიდიდის გამოთვლის საშუალებას.

დ) ვექტორული დიაგრამები. სამგრაგნილიან ტრანსფორმატორში ძაბვების თანაფარდობა გამოსახული (12,8) და (12,9) ტოლობებით, ადვილად გამოისახება გრაფიკულად ვექტორული დიაგრამების საშუალებით. ასეთი დიაგრამა შემთხვევისათვის, როდესაც წინააღმდეგობა $x_3 < 0$, ე. ი. როდესაც გრაგ-



ნახ. 153. მოკლედ შერთვის საკონტროლო ცდის სქემა.

ნილი 3 მოთავსებულია 1 და 2 გრაგნილებს შორის, წარმოდგენილია ნახ. 154-ზე. ვექტორული დიაგრამის აგების დროს აუცილებელია ვიცოდეთ I_1 , I_2 , I_3 დენებს შორის ძვრის კუთხე. მივიღებთ რა მხედველობაში, რომ კუთხე $\varphi \approx 0$, შეგვიძლია ჩავთვალოთ დაახლოებით

$$\alpha = \varphi_2 - \varphi_3 + \beta \approx \varphi_2 - \varphi_3.$$

ე) ძაბვის პროცენტული ცვლილება. სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ძაბვის პროცენტული ცვლილების განსაზღვრისათვის ვისარგებლოთ (12,8) და (12,9) ტოლობებით და მათგან (12,7)-ს საშუალებით გამოვირიცხოთ დენი I_1 :

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_2 = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 Z_2 = -\dot{I}_2 (Z_1 + Z_2) - \dot{I}_3 Z_1 = -\dot{I}_2 Z_{k12} - \dot{I}_3 Z_1; \quad (12,24)$$

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_3 = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_3 Z_3 = -\dot{I}_3 Z_{k13} - \dot{I}_2 Z_1. \quad (12,25)$$

ნახ. 155-ზე ეს ტოლობები მოცემულია ვექტორული დიაგრამების სახით, რომლებიც წარმოადგენს სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ვექტორული დიაგრამების სხვა სახეს.

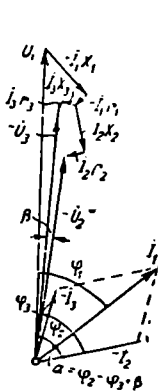
ვსარგებლობთ რა იგივე მეთოდით, როგორცაც ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორებისათვის, ნახ. 155-ის საფუძველზე ადვილად მივიღებთ ცალკეულ გრაგნილებისათვის ძაბვის პროცენტული ცვლილების გამოსახვას უქმი სელიდან დატვირთვაზე გადასვლისას:

$$\Delta U_{12} = e_{a12} \cos \varphi_2 + e_{r12} \sin \varphi_2 + e_{a1} \cos \varphi_3 + e_{r1} \sin \varphi_3 + \frac{(e_{a12} \sin \varphi_2 - e_{r12} \cos \varphi_2 + e_{a1} \sin \varphi_3 - e_{r1} \cos \varphi_3)^2}{200}; \quad (12,26)$$

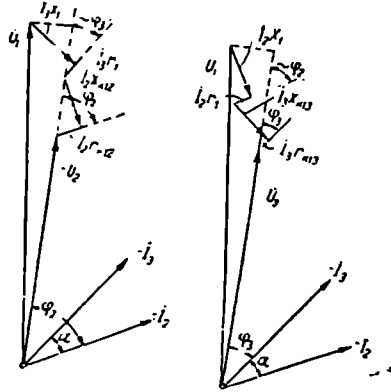
$$\Delta U_{13} = e_{a13} \cos \varphi_2 + e_{r13} \sin \varphi_2 + e_{a1} \cos \varphi_3 + e_{r1} \sin \varphi_3 + \frac{(e_{a13} \sin \varphi_2 - e_{r13} \cos \varphi_2 + e_{a1} \sin \varphi_3 - e_{r1} \cos \varphi_3)^2}{200}. \quad (12,27)$$

აქ e_a და e_r -ის ყველა მნიშვნელობები შეესაბამება იმ I_2 და I_3 დენებს, რომლებისათვისაც განისაზღვრება ძაბვის პროცენტული ცვლილება.

ვ) სიმძლავრეების თანაფარდობა სამგრაგნილიან ტრანსფორმატორში. თუ გრაგნილით 2 გადაეცემა მოჩვენებითი სიმძლავრე $S_2 I_2$, ხოლო გრაგნი-



ნახ. 154. სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ვექტორული დიაგრამა.



ნახ. 155. სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის სახეშეცვლილი ვექტორული დიაგრამები.

ლით 3 სიმძლავრე $S_3 I_3$, მაშინ 1 გრაგნილის სიმძლავრე დანაკარგების მხედველობაში მიუღებლივ უნდა ტოლი იყოს:

$$S I_1 = |S_2 I_2 + S_3 I_3|, \quad (12,28)$$

რაც გამოვლინარეობს ტოლობიდან:

$$I_1 = |I_2 k_{21} + I_3 k_{31}| = \left| I_2 \frac{U_2}{U_1} + I_3 \frac{U_3}{U_1} \right|.$$

როდესაც $\cos \varphi_2 \approx \cos \varphi_3$, მივიღებთ:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 + U_3 I_3, \quad (12,29)$$

ე. ი. ამ შემთხვევაში პირველადი გრაგნილის მოჩვენებითი სიმძლავრე მეორადი გრაგნილების მოჩვენებითი სიმძლავრეების ჯამის ტოლია.

ცალკეული გრაგნილების სიმძლავრე დადგინდება ექსპლოატაციის პირობებისაგან დამოკიდებულებით. სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორისათვის OCT 2524 უშვებს ცალკეული გრაგნილების სიმძლავრეების შემდეგ თანაფარდობებს პროცენტებში ნომინალურ სიმძლავრისაგან (იხ. ცხრ.)

პირველი გრაგნილი	მეორე გრაგნილი	მესამე გრაგნილი
100	100	100
100	100	66,7
100	66,7	100
100	66,7	66,7

სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ნომინალურ სიმძლავრედ მიღებულია მისი ყველაზე მძლავრი გრაგნილის სიმძლავრე. ამ სიმძლავრესთან მიიყენება აგრეთვე მოკლედ შერთვის ყველა ძაბვები E_{12} , E_{13} , E_{23} , რომლებიც ნაჩვენებია ტრანსფორმატორის დაფაზე. სამფაზა სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორებისათვის OCT-ის მიხედვით გამოიყენება გრაგნილების შეერთების სქე-

მა — $Y_0/Y_0/A-12-11$, ხოლო ერთფაზა ტრანსფორმატორებისათვის $I/I/I-12-12$

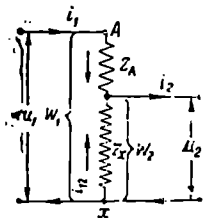
13. ავტოტრანსფორმატორები

ა) მოქმედების პრინციპი და ძირითადი თანაფარდობანი. ავტოტრანსფორმატორი წარმოადგენს „ერთგრაგნილიან“ ტრანსფორმატორს, რომელსაც ნაცლად დაბალი ძაბვის დამოუკიდებელი გრაგნილისა. აქვს დაშატებითი გამოიყვანი გრაგნილის რომელიმე შუალედი წერტილიდან. ნახ. 156-ზე ნაჩვენებია ერთფაზა დამწვევი ავტოტრანსფორმატორის სქემა.

თუ პირველადი მხრიდან ხაზური ძაბვა და ხაზური დენი ტოლია U_1 და I_1 -ის, ხოლო მეორადი მხრიდან — U_2 და I_2 -ის, მაშინ უგულებელყოფთ რა დანაკარგებს, მივიღებთ:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 = P. \quad (13,1)$$

თუ გრაგნილის სრული ხვევთა რიცხვი ტოლია w_1 , ხოლო განშტოების ხვევთა რიცხვი ტოლია w_2 -ის, მაშინ ნახ. 156-ის თანახმად U_1 და U_2 ძაბვები იმყოფება ტრანსფორმატორისათვის ჩვეულებრივ თანაფარდობაში



ნახ. 156.

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} = k_{12}. \quad (13,2)$$

(13,1) და (13,2)-დან გამომდინარეობს:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{k_1} = k_{21}. \quad (13,3)$$

გრაგნილის ნაწილი ω_2 ხვევთა რიცხვით შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი შეთავსებული პირველადთან. ამიტომ დენი I_{12} , რომელიც გადის გრაგნილის ამ ნაწილში, ტოლია პირველადი და მეორადი დენების გეომეტრიულ ჯამის:

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2. \quad (13,4)$$

თუ დამამაგნიტებელ დენს მივიღებთ ნულის ტოლად, მაშინ შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ დენები \dot{I}_1 და \dot{I}_2 დაძრულია ფაზით 180° -ით და მათი გეომეტრიული ჯამი ტოლია არითმეტიკული სხვაობის. დამწვევ ავტოტრანსფორმატორში $I_2 > I_1$, ამიტომ გადავალთ რა მყისა მნიშვნელობებზე (ნახ. 156), შეიძლება მივიღოთ $i_{12} = i_2 - i_1$ და ჩავთვალოთ, რომ i_{12} მიმართულებით თანხვედნილია i_2 დენთან და მიმართულია i_1 დენის საწინააღმდეგოდ.

ავტოტრანსფორმატორში გრაგნილის ნაწილები $A-a$ და $a-x$ (a -დაბალი აბავის წრედის განშტოების წერტილია), რომლებშიაც დენი გადის საწინააღმდეგო მიმართულებით, მაგნიტურად გაწონასწორებულია

$$I_1(\omega_1 - \omega_2) = I_2\omega_2 - I_1\omega_1 = (I_2 - I_1)\omega_2 = I_{12}\omega_2. \quad (13,5)$$

ყოველ ელექტრულ მანქანაში და ტრანსფორმატორში მაგნიტური არეს საშუალებით გადაცემული სიმძლავრე ტოლია

$$EI = k\Phi I\omega,$$

და, მაშასადამე, პროპორციულია მაგნიტური ნაკადის და ამ სიმძლავრის მიმღები გრაგნილის აბპერხვევების ნამრავლის.

ავტოტრანსფორმატორში მაგნიტური არეს საშუალებით გადაცემა სიმძლავრე

$$P_{\Phi} = k\Phi I_1(\omega_1 - \omega_2) = k\Phi I_{12}\omega_2. \quad (13,6)$$

ვინაიდან

$$k\Phi(\omega_1 - \omega_2) = E_1 - E_2 \quad \text{და} \quad k\Phi\omega_2 = E_2,$$

P_{Φ} სიმძლავრე შეიძლება აგრეთვე გამოსახულ იქნეს შემდეგი სახით:

$$P_{\Phi} = (E_1 - E_2)I_1 = E_2 I_{12} \approx (U_1 - U_2)I_1 \approx U_2 I_{12} \quad (13,7)$$

ეს სიმძლავრე ავტოტრანსფორმატორისათვის წარმოადგენს საანგარიშოს, ვინაიდან Φ ნაკადი განსაზღვრავს გულანის ზომებს, ხოლო აბპერხვევები $I_1(\omega_1 - \omega_2) = I_{12}\omega_2$ - გრაგნილის ცალკეული ნაწილების ზომებს.

(13,1) და (13,7) ტოლობის შედარება გვიჩვენებს, რომ ავტოტრანსფორ-

მატორის საანგარიშო სიმძლავრე ნაკლებია სრულ ან გამავალ P სიმძლავრეზე, რომელიც გადაეცემა პირველადი ქსელიდან მეორად წრედს:

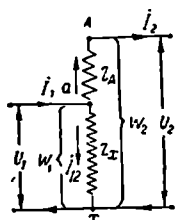
$$\frac{P_{\Phi}}{P} = \frac{U_1 I_1 \left(\frac{w_1 - w_2}{w_1} \right)}{U_1 I_1} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} = 1 - k_{21}. \quad (13,8)$$

გამავალ და საანგარიშო სიმძლავრეებს შორის სხვაობა

$$P - P_{\Phi} = P - P(1 - k_{21}) = P \cdot k_{21}, \quad (13,9)$$

გადაეცემა პირველადი ქსელიდან მეორადში უშუალოდ ელექტრული კავშირის საშუალებით, რომელიც არსებობს მათ შორის.

ბ) ძაბვის ვარდნა ავტოტრანსფორმატორებში. ავტოტრანსფორმატორში დატვირთვის დროს ძაბვის ვარდნის განსაზღვრისათვის გამოვიღვართ ძაბვის შემდეგი განტოლებებიდან (ნახ. 156):



ნახ 157.

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_A + \dot{I}_{12} Z_x; \quad (13,10)$$

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2 k_{12} - \dot{I}_{12} Z_x k_{12} = \dot{E}_1 - \dot{I}_{12} Z_x k_{12}. \quad (13,11)$$

ამ ორი ტოლობის შეჯამებით ვღებულობთ

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - (-\dot{U}_2') &= \dot{I}_1 Z_A + \dot{I}_{12} Z_x (1 - k_{12}) = \\ &= \dot{I}_1 [Z_A + Z_x (1 - k_{12})^2]. \end{aligned} \quad (13,12)$$

ამ გამოსახულებაში $Z_x (1 - k_{12})^2$ სხვა არა არის რა, თუ არა Z_x წინააღმდეგობა მიყვანილი $w_1 - w_2$ ხვევთა რიცხვზე.

ამწვევ ავტოტრანსფორმატორში ძაბვის ვარდნა განისაზღვრება ანალოგიურად:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{12} Z_x; \quad (13,13)$$

$$U_2' = \dot{E}_2 k_{12} - \dot{I}_{12} Z_x k_{12} = \dot{E}_1 - \dot{I}_{12} Z_x k_{12}. \quad (13,14)$$

ამ ტოლობების შეჯამებით ვღებულობთ:

$$\dot{U}_1 - (-\dot{U}_2') = \dot{I}_{12} Z_x (1 - k_{12}) - \dot{I}_{12} Z_x k_{12}. \quad (13,15)$$

ვღებულობთ რა მხედველობაში, რომ $\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ და $\dot{I}_2 \approx -\dot{I}_1 k_{12}$, (13,15) ტოლობაში \dot{I}_{12} და \dot{I}_2 დენების \dot{I}_1 დენით შეცვლის შემდეგ ვღებულობთ:

$$\dot{U}_1 - (-\dot{U}_2') = \dot{I}_1 [Z_x k_{12}^2 + Z_x (1 - k_{12})^2]. \quad (13,16)$$

(13,16) ტოლობა შეიძლება გარდაქმნილ იქნეს შემდეგნაირად:

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_2' = \dot{I}_1 k_{12}^2 [Z_A + Z_x (k_{21} - 1)^2]. \quad (13,17)$$

$Z_z(k_{21}-1)^2$ გამოსახვა წარმოადგენს w_2-w_1 ხვევთა რიცხვთან მიყვანილ Z_z წინააღმდეგობას.

ავტოტრანსფორმატორში დატვირთვის დროს ძაბვის ვარდნის მიღებული (13,12) და (13,17) მნიშვნელობები გეიჩვენებს, რომ დამწვევ ავტოტრანსფორმატორში ძაბვის ვარდნა შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს, როგორც I_1 პირველადი დენის ნამრავლი გრაგნილის ორივე ნაწილის, w_1-w_2 (ან w_2-w_1) ხვევთა რიცხვების სხვაობასთან, მიყვანილ წინააღმდეგობაზე. თუ გვაქვს ამწვევი ავტოტრანსფორმატორი, მაშინ ეს წინააღმდეგობა მრავლდება დამატებით აგრეთვე k_{12}^2 -ზე.

გ) მოკლედ შერთვის ძაბვა $e_k\%$. ავტოტრანსფორმატორში ისე, როგორც ჩვეულებრივ ტრანსფორმატორში, მოკლედ შერთვის ძაბვა განისაზღვრება გამოსახვით:

$$e_k = -\frac{I_H Z_k}{U_H} 100\% \quad (13,18)$$

ჩავთვალოთ რა (13,12) გამოსახვაში $I_1=I_H$ და $U_2=0$, დამწვევ ავტოტრანსფორმატორის Z_k მოკლედ ჩართვის წინააღმდეგობისათვის მივიღებთ:

$$Z_k = Z_A + Z_z(1-k_{12})^2 \quad (13,19)$$

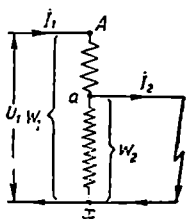
ამიტომ

$$e_k = \frac{I_H [Z_A + Z_z(1-k_{12})^2]}{U_H} 100 \quad (13,20)$$

და სათანადოდ

$$e_a = \frac{I_H [r_A + r_z(1-k_{12})^2]}{U_H} 100; \quad (13,21)$$

$$e_r = \frac{I_H [x_A + x_z(1-k_{12})^2]}{U_H} \quad (13,22)$$



ნახ. 158. ავტოტრანსფორმატორის მოკლედ შერთვის სქემა.

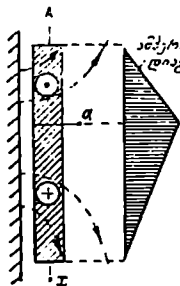
თუ გამოვალთ (13,16) ტოლობიდან ანალოგიური გამოსახვები, შეიძლება მიღებულ იქნეს ამწვევი ავტოტრანსფორმატორისთვისაც.

უნდა აღინიშნოს, რომ სხვა ყველა ერთგვარ პირობებში ავტოტრანსფორმატორისათვის მოკლედ შერთვის ძაბვა e_k ყოველთვის უფრო მცირეა, ვიდრე ჩვეულებრივ ორგრაგნილიან ტრანსფორმატორისათვის. ეს იმით აიხსნება, რომ ავტოტრანსფორმატორში w_1-w_2 ხვევების შესაბამისი ფანტის ე. მ. დ. და აქტიური ძაბვის ვარდნა მიიყვანება არა ამ ხვევების ძაბვასთან, არამედ ყველა პირველად w_1 ხვევების ძაბვასთან, ამიტომ მოკლედ შერთვის ძაბვა მიიღება $\frac{w_1}{w_1-w_2}$ -ჯერ მცირე. e_k -ს შემცირებული მნიშვნელობა განაპირობებს ავტოტრანსფორმატორის მოკლედ შერთვის დენის მაღალ ჯერადობას.

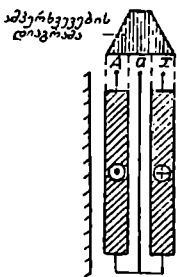
ავტოტრანსფორმატორის მოკლედ შერთვას აქვს კიდევ ერთი თავისებურება. ნახ. 158-დან ჩანს, რომ გრაგნილის $a-x$ ნაწილის მოკლედ შერთვასთან ერთად, ძაბვა, გრაგნილის მეორე $A-a$ ნაწილზე U_1-U_2 მნიშვნე-

ლობიდან იზრდება U_1 -მდე. ბუნებრივია, რომ ძაბვის გაზრდა იწვევს გულანის მნიშვნელოვან გადატენიანებას და დამამაგნიტებელი დენის გაზრდას.

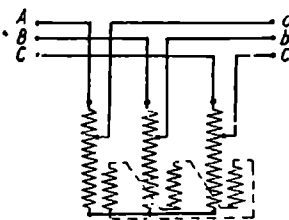
ღ) ავტოტრანსფორმატორის მოწყობილობა. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული ავტოტრანსფორმატორი პრინციპში წარმოადგენს ერთგრაფილიან ტრანსფორმატორს. მაგრამ, როგორც წესი იგი კონსტრუქციულად სრულდება ორი გრაფილის სახით, რომლებიც შემდეგ ელექტრულად ერთდება. ეს ახსნება ძირითადად იმით, რომ ერთ მთლიან გრაფილის სახით შესრულებულ ავტოტრანსფორმატორს ექნებოდა ძალიან დიდი ფანტვის არე და მაშასადამე, ძალიან დიდი ძაბვის ვარდნა და დამატებითი დანაკარგება. ამას თავსაჩინოდ ვხედავთ ნახ. 159-ზე, სადაც გამოხატულია ასეთი ავტოტრანსფორმატორის ფანტვის არე.



ნახ. 159. ერთი მთლიანი გრაფილის სახით შესრულებული ავტოტრანსფორმატორის ფანტვის არე.



ნახ. 160.



ნახ. 161. სამფაზა ავტოტრანსფორმატორის გრაფილების შეერთების უმარტივესი სქემა. (პუნქტირით ნაჩვენებია სამკუთხედად შეერთებული დამატებითი გრაფილი).

ნახ. 160-ზე ნაჩვენებია ერთფაზა ავტოტრანსფორმატორის პრაქტიკული სქემა გრაფილის მაგნიტურად გაწონასწორებული ნაწილების კონცენტრიული განლაგებით. ასეთ ავტოტრანსფორმატორში ფანტვის არეს კონფიგურაცია ისეთივე იქნება, როგორც ჩვეულებრივ ტრანსფორმატორში.

სამფაზა ავტოტრანსფორმატორების შესრულების დროს გრაფილების შეერთების უმარტივესი და ყველაზე მეტად გავრცელებულ სქემას წარმოადგენს ვარსკვლავი (ნახ. 161), რომლის ნულოვანი წერტილი შეიძლება დამოწმებულ იყოს ან გამოყენებული ნეიტრალური გამტარის მისაერთებლად.

მაღალი ძაბვის ავტოტრანსფორმატორებში ასეთი სქემის გამოყენებისას, მაგნიტურ ნაკადში მესამე ჰარმონიკის თავიდან ასაცილებლად გამოიყენება სამკუთხედად შეერთებული დამატებითი გრაფილი, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 161-ზე პუნქტირით.

ე) ავტოტრანსფორმატორების გამოყენების სფერო. (13,8) ტოლობა გვიჩვენებს, რომ ავტოტრანსფორმატორის გამოყენება ხელსაყრელია ტრანსფორმაციის კოეფიციენტების ერთთან ახლოს მნიშვნელობებისათვის. ამ შემთხვევაში სიმძლავრე, რომელზედაც უნდა გაითვალის ავტოტრანსფორმატორის

რი, გაცილებით მცირეა, ვიდრე ეკვივალენტური ტრანსფორმატორის სიმძლავრე. მაგ. თუ $k_{1,2} = 1,2$, მაშინ

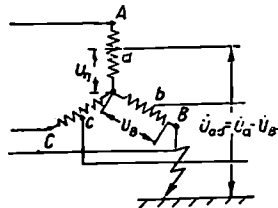
$$\frac{P\Phi}{P} = 1 - \frac{1}{1,2} = 0,165.$$

ეს ნიშნავს არა მარტო მასალის მნიშვნელოვან ეკონომიას, და მაშასადამე, ტრანსფორმატორის ღირებულების შემცირებებს, არამედ აგრეთვე საექსპლუატაციო ხარჯების შემცირებებსაც. მოცემული დენის სიმკვრივის და ინდუქციის პირობებში აქტიური მასალების წონების შემცირებას ნივთიერათ იქამდე, რომ დანაკარგები ავტოტრანსფორმატორში მუდამ უფრო მცირეა, ვიდრე იგივე გამავალი სიმძლავრის ტრანსფორმატორში, ამიტომაც ავტოტრანსფორმატორის მ. კ. კ. უფრო მაღალია, ვიდრე ტრანსფორმატორის.

მაგრამ რამდენადაც ტრანსფორმატორის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ერთისაგან მეტადაა განსხვავებული, ავტოტრანსფორმატორის აღნიშნულ უპირატესობები სწრაფად მცირდება და ერთდროულად იზრდება მაღალი ძაბვის მხრიდან, დაბალი ძაბვის გრაგნილში გადაცემული გადაძაბებისაგან გამოწვეული საფრთხე. ამიტომ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის მაღალი მნიშვნელობებისათვის ავტოტრანსფორმატორები არ გამოიყენება.

უფრო მეტი გავრცელება ავტოტრანსფორმატორებმა ქსელებში ჰპოვეს, ძაბვის რეგულირების მიზნებისათვის და აგრეთვე ძაბვის შემცირებისათვის ასინქრონული და სინქრონული ძრავების გაშვების დროს.

უნდა აღინიშნოს, რომ დაბალი ძაბვის ქსელებშიაც კი ავტოტრანსფორმატორის გამოყენება ზოგჯერ შეიძლება საშიში იყოს. თუ მაგალითად, გამოვიყენებთ ვარსკვლავად შეერთებულ ავტოტრანსფორმატორს 12 V-იანი საქვებ ნათურების, 120 V-იანი ქსელიდან კვებისათვის, მაშინ, როგორცეს ნახ. 162-დან სჩანს, მაღალი ძაბვის მხარეზე ხაზური გამტარის შემთხვევითი დამიწებისას a და c გამტარებზე ძაბვა მიწის მიმართ გაიზრდება საშიშ მნიშვნელობამდე $\bar{U}_{a0} = |\bar{U}_a - \bar{U}_B|$, რომელიც აღებულ შემთხვევაში 75 V-ის ტოლია.



ნახ. 162. ავტოტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის მხარეზე ძაბვის აწევა მაღალი ძაბვის მხარეზე გამტარის დამიწების დროს.

14. ტრანსფორმატორის არასიმეტრიული დატვირთვა

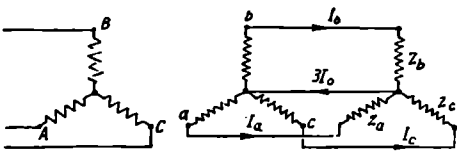
ა) არასიმეტრიული დატვირთვის ზოგადი დახასიათება. ტრანსფორმატორების ექსპლუატაციის დროს არც ისე იშვიათად საქმე გვაქვს ტრანსფორმატორების მოშქერებზე ძაბვების და ცალკეული ფაზების გრაგნილებში გამავალი დენების არასიმეტრიულობასთან; ამასთან წარმოიშება მოვლენები, რომელთაც ადგილი არა აქვს ნორმალური მუშაობის პირობებში. არასიმეტრიულობამ თავისი ხასიათისა და ხარისხის მიხედვით შეიძლება მიგვიყ-

ვანოს ტრანსფორმატორის მუშაობის შთლიან დარღვევასთან და მისი მწყობრიდან გამოსვლასთანაც კი.

გარდა ამისა, ძაბვების არასიმეტრიულობა ფრიად არასასურველად მოქმედებს ელექტრული ენერჯის მომხმარებლებზე, იგი იწვევს ვარვარების ნათურების სწრაფ გადაწვას ძაბვის აწვევის შემთხვევაში, ან მათი სინათლის ენერჯის არამთლიანად გამოყენებას, ცალკეული ფაზების ძაბვების დაწვევის შემთხვევაში. ძაბვების არასიმეტრიულობა იწვევს აგრეთვე ძრავების სიმძლავრის შემცირებას. ამიტომ ტრანსფორმატორების მუშაობის არასიმეტრიული რეჟიმების შესწავლას დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს.

არასიმეტრიული ელექტრული წრედების გამოკვლევის ზოგად მეთოდს წარმოადგენს, სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდი.

პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სისტემებს ზოგად შემთხვევაში შეესაბამება თავისი პარამეტრები, კერძოდ, აქტიური და რეაქტიული წინაღმდეგობები. მაგრამ ტრანსფორმატორებში, სადაც არა გვაქვს მბრუნავი ნაწილები და მბრუნავი არეები, აქტიური და რეაქტიული წინაღმდეგობები პირდაპირი და უკუმიმდევრობის სისტემებისათვის მიიღება ერთნაირი. მართლაც თუ ტრანსფორმატორის მომქერებზე გადაუნაცვლებთ ადგილებს ორ მომყვან გამტარს, ძაბვის და დენის სისტემა იცვლება უკუზე, მაგრამ ტრანსფორმატორის შინაგანი წინაღმდეგობები რჩება უცვლელი. ეს გარემოება პნიშვნელოვნად ამარტივებს ტრანსფორმატორის არასიმეტრიულ დატვირთვასთან დაკავშირებულ ამოცანების გადაწყვეტას, რადგან პირდაპირი და უკუმიმდევრობის მდგენელების ნაცვლად შეიძლება მოვახდინოთ ოპერირება მათი გეომეტრიული ჯამით.



ნახ. 163. ნულოვანი მიმდევრობის დენების კონტური წრედში: ტრანსფორმატორი—დატვირთვა—ნეიტრალური გამტარი.

1 და 2 ინდექსებით პირდაპირი და უკუმიმდევრობები. ჯამური დენები ფაზაში ტოლი იქნება:

ამ პირობებში დენების სისტემებისათვის მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} &= \dot{I}'_a, \\ \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} &= \dot{I}'_b, \\ \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} &= \dot{I}'_c, \end{aligned} \quad (14,1)$$

სადაც a, b, c ინდექსებით აღნიშნულია ფაზები, ხოლო

$$\dot{I}_a = \dot{I}'_a + \dot{I}_{a0}, \quad \dot{I}_b = \dot{I}'_b + \dot{I}_{b0}, \quad \dot{I}_c = \dot{I}'_c + \dot{I}_{c0}, \quad (14,2)$$

სადაც დენი $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0$ წარმოადგენს ნულოვანი მიმდევრობის დენს. ეს დენი შეიძლება წარმოიშვას არა ყოველ სისტემაში. მაგალითად სამფაზა ტრანსფორმატორის ვარსკვლავად შეერთებულ გრაგნილში I_0 დენი არ შეიძლება წარმოიშვას, ვინაიდან მისთვის არ არსებობს გამტარი კონტური. მაგრამ, თუ მაგალითად გრაგნილის ნეიტრალს შევაერთებთ დატვირთვის საშუ-

ალო წერტილთან (ნახ. 163), მაშინ არასიმეტრიული დატვირთვის დროს ნეიტრალურ გამტარში გაივლის ფაზური დენების ჯამის ტოლი დენი $3I_0$.

იმ შემთხვევაში, როდესაც ნულოვანი მიმდევრობის დენი არ არსებობს, (14,2) ტოლობები მარტივდება:

$$I_a' = I_a, \quad I_b' = I_b, \quad I_c' = I_c. \quad (14,3)$$

სამუხა ტრანსფორმატორების გრაგნილების შეერთების ძირითადი სქემებია Y/Y , Y/Δ Y/Y_0 . ამ სქემებისათვის ჩვენ განვიხილავთ კიდევ შემდეგში არასიმეტრიულ დატვირთვისას. ამასთან ჩათვლით, რომ მოცემულია პირველადი ხაზური ძაბვები და მეორადი ხაზური დენები და მათი საშუალებით განვსაზღვრავთ დანარჩენ სიდიდეებს. სიმარტივისათვის დავუშვათ, რომ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი ტოლია ერთის და დამაგნიტების დენი კი ნულის.

ბ) გრაგნილების შეერთება სქემით. ვარსკვლავი-ვარსკვლავი. ამ სქემაში (ნახ. 164) ცალკეულ ფაზებს შორის დატვირთვის განაწილების მიუხედავად ხაზური დენებისათვის სამართლიანია ტოლობები:

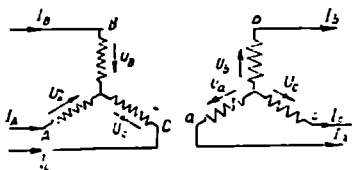
$$I_A + I_B + I_C = 0; \quad (14,4)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0. \quad (14,5)$$

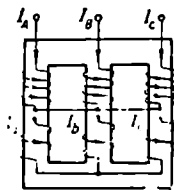
ვინაიდან დამამაგნიტებელი დენი დაახლოებით მიღებული გვაქვს ნულის ტოლად, სრული დენი გულანის ნებისმიერ შეკრულ მაგნიტურ კონტურის შიგნით ასევე ნულის ტოლი იქნება. ამიტომ $A-B$ და $A-C$ ლეროებით შექმნილ კონტურებისათვის შეგვიძლია დავწეროთ (ნახ. 165):

$$I_A + I_a - I_b - I_B = 0; \quad (14,6)$$

$$I_A + I_a - I_c - I_C = 0. \quad (14,7)$$



ნახ. 164. დენების განაწილება ვარსკვლავი-ვარსკვლავი სქემით შეერთების შემთხვევაში.



ნახ. 165. ჩაკტილი მაგნიტური კონტურები სამუხა ტრანსფორმატორის გულანაში (დენების მიმართულება გრაგნილებში მიღებულია პირობით).

(14,4), (14,5), (14,6) და (14,7) ტოლობების ერთობლივი გადაწყვეტით უპოულობთ;

$$I_A = -I_a, \quad I_B = -I_b, \quad I_C = -I_c. \quad (14,8)$$

მაშასადამე, თვითეულ გულანახე პირველადი და მეორადი დენები მაკ-
ნიტური მბრივ ერთმანეთს აწონასწორებენ.

პირველადი ფაზური ძაბვების განსაზღვრისათვის შეიძლება გამოვიღოთ
შემდეგი თანაფარდობებიდან (ნახ. 164):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A - \dot{I}_A Z_1 &= -\dot{E}_A, \\ \dot{U}_B - \dot{I}_B Z_1 &= -\dot{E}_B, \\ \dot{U}_C - \dot{I}_C Z_1 &= -\dot{E}_C. \end{aligned} \right\} \quad (14,9)$$

ვინაიდან სამფაზა ტრანსფორმატორებში შეიძლება ჩაეთვალოთ

$$\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0 \quad (14,10)$$

და მაშასადამე,

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0, \quad (14,11)$$

(14,9) ტოლობების შეკრებით მივიღებთ:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0. \quad (14,12)$$

ნახ. 166-დან გამომდინარეობს, რომ

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A, \\ \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C. \end{aligned} \right\} \quad (14,13)$$

(14,12) და (14,13) განტოლებათა სისტემის გადა-
წყვეტით ვპოულობთ, რომ ფაზური ძაბვების ვარსკ-
ვლავის ცენტრი, ძვეს ხაზური ძაბვების სამკუთხედის
სიმძიმის ცენტრში, ამიტომ

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \frac{\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{CA}}{3}, \\ \dot{U}_B &= \frac{\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{AB}}{3}, \\ \dot{U}_C &= \frac{\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{BC}}{3}. \end{aligned} \right\} \quad (14,14)$$

ნახ. 166. ძაბვების დიაგ-
რამა ვარსკვლავი-ვარსკ-
ვლავი შეერთების
შემთხვევაში.

მეორადი ფაზური ძაბვები ტოლია პირველადისა, ტრანსფორმატორში
ძაბვის ვარდნის გამოკლებით:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A - \dot{I}_A Z_K &= -\dot{U}_a, \\ \dot{U}_B - \dot{I}_B Z_K &= -\dot{U}_b, \\ \dot{U}_C - \dot{I}_C Z_K &= -\dot{U}_c. \end{aligned} \right\} \quad (14,15)$$

მეორადი ხაზური ძაბვები განისაზღვრება, როგორც ფაზური ძაბვების სხვაობა:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_b - \dot{U}_a \\ \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_c - \dot{U}_b \\ \dot{U}_{ca} &= \dot{U}_a - \dot{U}_c \end{aligned} \right\} \quad (14,16)$$

მიღებული თანათარღობები განემარტოთ არასიმეტრიულობის უკიდურესი შემთხვევის მაგალითზე, როდესაც ორ ფაზას შორის მოხდა მოკლედ შერთვა, მესამეში კი ღენი არ არის.

ამ შემთხვევაში ნახ. 167-ზე მოცემული სქემის მიხედვით უნდა დავუშვათ:

$$\dot{I}_a = 0; \quad \dot{I}_b = -\dot{I}_c.$$

ამ მნიშვნელობების ჩასმით (14,8)-ში, ვპოულობთ:

$$\dot{I}_A = 0; \quad \dot{I}_B = -\dot{I}_C = -\dot{I}_b,$$

(14,15) ტოლობებიდან გამომდინარეობს:

$$\dot{U}_A - 0 = -\dot{U}_a; \quad \dot{U}_B - \dot{I}_B Z_k = -\dot{U}_b; \quad \dot{U}_C + \dot{I}_C Z_k = -\dot{U}_c.$$

მოკლედ შერთვის დროს $\dot{U}_b - \dot{U}_c = 0$, ამიტომ $\dot{U}_b = \dot{U}_c$ და მაშასადამე:

$$\dot{U}_b = \dot{U}_c = -\frac{\dot{U}_B + \dot{U}_C}{2}.$$

(14,15)-ის თანახმად ვღებულობთ

$$\dot{U}_{ca} = -\frac{\dot{U}_B + \dot{U}_C}{2} + \dot{U}_A; \quad \dot{U}_{bc} = 0; \quad \dot{U}_{ca} = -\dot{U}_A + \frac{\dot{U}_B + \dot{U}_C}{2}.$$

ნახ. 168-ზე მოყვანილია ვექტორული დიაგრამა განხილულ შემთხვევისათვის.

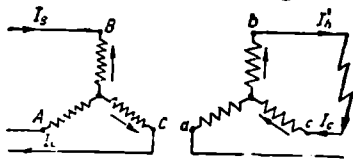
გ) პირველადი გრაგნილის შეერთება ხაშკუთხედად, მეორადის ვარჯკვლავად. შეერთების მოცემული სქემისათვის (ნახ. 169), ძალაში რჩება (14,4) და (14,5) ტოლობები. პირველადი და მეორადი გრაგნილების მაგნიტური წონასწორობის პირობებიდან გამომდინარეობს:

$$\dot{I}_A \phi = -\dot{I}_a, \quad \dot{I}_B \phi = -\dot{I}_b, \quad \dot{I}_C \phi = -\dot{I}_c, \quad (14,17)$$

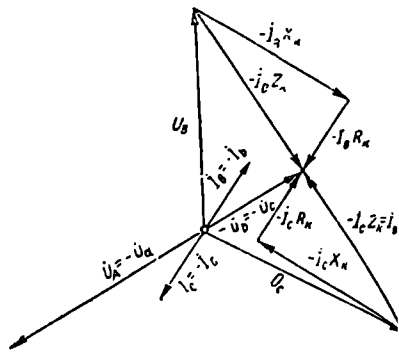
სადაც $\dot{I}_A \phi$, $\dot{I}_B \phi$, და $\dot{I}_C \phi$ პირველადი ფაზური ღენებია.

პირველადი ხაზური ღენები გამოითვლება როგორც ფაზური ღენების სხვაობა.

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{B\phi} - \dot{I}_{A\phi} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{C\phi} - \dot{I}_{B\phi} = \dot{I}_2 - \dot{I}_3, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{A\phi} - \dot{I}_{C\phi} = \dot{I}_3 - \dot{I}_1. \end{aligned} \right\} (14, 18)$$



ნახ. 167. ასიმეტრულობის უკიდურესი შემთხვევა ვარსკვლავი-ვარსკვლავი შეერთების დროს.



ნახ. 168.

მეორადი ფაზური ძაბვები განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებიდან:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A - \dot{I}_{A\phi} Z_k &= -\dot{U}_a, \\ \dot{U}_B - \dot{I}_{B\phi} Z_k &= -\dot{U}_b, \\ \dot{U}_C - \dot{I}_{C\phi} Z_k &= -\dot{U}_c. \end{aligned} \right\} (14, 19)$$

მეორადი ხაზური ძაბვები განისაზღვრება (14,16) ტოლობის თანახმად.

მოყვანილი თანაფარდობებიდან გამომდინარეობს, რომ გრაგნილების სამკუთხედი-ვარსკვლავი სქემით შეერთებისას, არასიმეტრიული დატვირთვის შემთხვევაში თვითეული ფაზა შეიძლება განვიხილოთ, როგორც დამოუკიდებელი ტრანსფორმატორი.

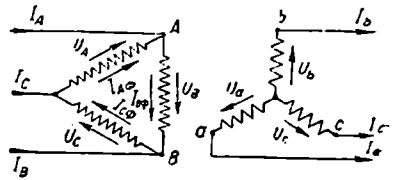
ღ) პირველადი გრაგნილის შეერთება ვარსკვლავად, მეორადის—სამკუთხედად. შეერთების მოცემული სქემისათვის (ნახ. 170) ისე, როგორც წინა შემთხვევაში (14,4) და (14,15) ტოლობები ინარჩუნებენ თავის მნიშვნელობას. გარდა ამისა, ადგილი აქვს მაგნიტური წონასწორობის პირობებიდან გამომდინარე შემდეგ თანაფარდობებს:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a\phi} &= -\dot{I}_A, \\ \dot{I}_{b\phi} &= -\dot{I}_B, \\ \dot{I}_{c\phi} &= -\dot{I}_C. \end{aligned} \right\} (14, 20)$$

მეორე მხრივ (14,4) პირობის არსებობის გამო ადგილი აქვს ტოლობებს:

$$\dot{I}_{a\phi} + \dot{I}_{b\phi} + \dot{I}_{c\phi} = 0. \quad (14, 21)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{a_{eff}} &= \frac{I_a - I_c}{3}, \\ I_{b_{eff}} &= \frac{I_b - I_a}{3}, \\ I_{c_{eff}} &= \frac{I_c - I_b}{3}, \end{aligned} \right\} (14,22)$$

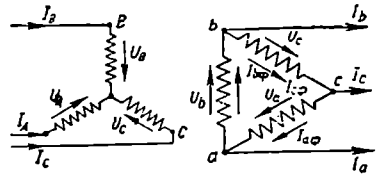


ნახ. 169. დენების განაწილება სამკუთხედი-
ვარსკვლავი სქემით შეერთების შემთხვევაში.

მაშასადამე, მეორადი ფა-
ზური დენების ვარსკვლავის ცენ-
ტრი ძვეს მეორადი ხაზური დე-
ნების სამკუთხედის სიმძიმის ცენ-
ტრში.

მეორადი ძაბვები განისაზღვრება
(14,15) ტოლობებით. პირველადი ფა-
ზური ძაბვების განსაზღვრის დროს კი,
უნდა გვეკონდეს მხედველობაში ის,
რომ მეორადი გრაგნილი შეერთებუ-
ლია სამკუთხედად, რის გამოც

$$U_a + U_b + U_c = 0. \quad (14,23)$$



ნახ. 170. დენების განაწილება ვარსკვლავი-
სამკუთხედი სქემით შეერთების შემთხვევაში.

(14,15) ტოლობების მარცხენა და
მარჯვენა ნაწილების შეკრებით და (14,4) და (14,23)-ის მხედველობაში მი-
ღებით, ვპოულობთ:

$$U_A + U_B + U_C = 0 \quad (14,24)$$

ამ ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ პირველადი ფაზური ძაბვები შეიძლება განისაზღვროს (14,14) ფორმულებით, მაშასადამე, პირველადი ფა-
ზური ძაბვების ვარსკვლავის ცენტრი ძვეს ხაზური ძაბვების სამკუთხედის
სიმძიმის ცენტრში.

გ) პირველადი გრაგნილის შეერთება ვარსკვლავად, მეორადის—ვარსკვ-
ლავად დამიწებული ნეიტრალური წერტილით. (14,2)-ის შესაბამისად მეო-
რადი დენები შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს ამ შემთხვევაში შემდეგი სახით
(ნახ. 171):

$$I_a = I'_a + I_0, \quad I_b = I'_b + I_0, \quad I_c = I'_c + I_0. \quad (14,25)$$

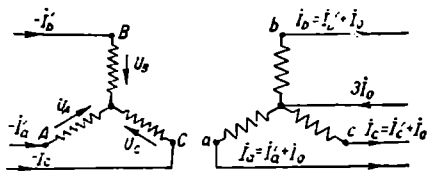
როგორც დადგენილი იყო, თვითეული ამ ტოლობის მარჯვენა ნაწილის
პირველი წევრი წარმოადგენს პირდაპირი და უკუმიმდევრობის დენების გეო-
მეტრიულ ჯამს, რომლებიც ტრანსფორმირდებიან რა ნორმალურად. მიმდი-
ნარეობენ ორივე გრაგნილში:

$$I'_a = -I_A, \quad I'_b = -I_B, \quad I'_c = -I_C. \quad (14,26)$$

ამ დენებისათვის საპარტოლიანია ტოლობა

$$I'_a + I'_b + I'_c = 0. \quad (14,27)$$

ნულოვანი მიმდევრობის დენი I_0 პირველად გრაგნილში ვერ გაივლის, არაღან მისთვის არ არის გამტარი კონტური. ამიტომ I_0 დენი თავის მოქმედებით წარმოადგენს, დამამაგნიტებელ დენს. მის მიერ შექმნილი ნაკადი Φ_0 , რომელიც ერთნაირია ყველა სამ ფაზაში, აინდუქტირებს თვითეული ფაზის გრაგნილში დამატებით E_0 ე. მ. ძ-ს.



ნახ. 171. დენების განაწილება შერთვის სქემის დროს: ვარსკვლავი-ვარსკვლავი დამიწებული ნეიტრალური წერტილით.

ეს ე. მ. ძ. პირველად მხარეზე ჯამდება რა მთავარი მაგნიტური ნაკადით აღძრულ ე. მ. ძ-სთან აწონასწორებს მოდებულ დაბვას, გრაგნილში შინაგანი დაბვის ვარ-

დნის გამოკლებით. მეორად გრაგნილში ის, მთავარი მაგნიტურ ნაკადით აღძრულ ე. მ. ძ-სთან ერთად განსაზღვრავს რეზულტიურ ფაზურ ე. მ. ძ-ს. ე. მ. ძ-ის სათანადო ვექტორული დიაგრამა მოყვანილია ნახ. 172-ზე.

I_0 დენის ამპლიტუდისა და ფაზისაგან დამოკიდებულებით მიიღება ფაზური ე. მ. ძ-ის ვარსკვლავის სხვადასხვაგვარი დამახინჯება.

პირველადი გრაგნილისათვის დაბვების განტოლებები შეიძლება დაწერილ იქნეს შემდეგი სახით:

$$\dot{U}_A - \dot{I}_A Z_1 = -\dot{E}_A - \dot{E}_0, \quad (14,28)$$

$$\dot{U}_B - \dot{I}_B Z_1 = -\dot{E}_B - \dot{E}_0, \quad (14,29)$$

$$\dot{U}_C - \dot{I}_C Z_1 = -\dot{E}_C - \dot{E}_0. \quad (14,30)$$

შემოვიღოთ აღნიშნა:

$$\dot{E}_0 = -\dot{I}_0 Z_0. \quad (14,31)$$

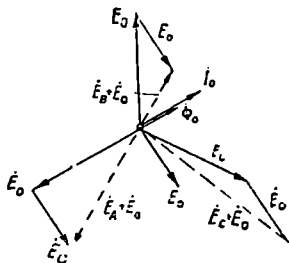
(14,28)—(14,30) ტოლობების შეკრებით და (14,4) და (14,11) მხედველობაში მიღებით გვექნება:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 3\dot{I}_0 Z_0. \quad (14,32)$$

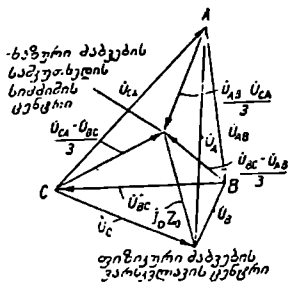
პირველადი ფაზური დაბვების განსაზღვრისათვის ვისარგებლოთ (14,13) ტოლობებით, რომელთა (14,28)—(14,30)-თან ერთად გადაწყვეტით ვიპოვიოთ:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \frac{\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{CA}}{3} + \dot{I}_0 Z_0, \\ \dot{U}_B &= \frac{\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{AB}}{3} + \dot{I}_0 Z_0, \\ \dot{U}_C &= \frac{\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{BC}}{3} + \dot{I}_0 Z_0. \end{aligned} \right\} \quad (14,33)$$

(14,33) ტოლობები გვიჩვენებს, რომ ფაზური ძაბვების ვარსკვლავის ცენტრი გადაადგილდება ხაზური ძაბვების სამკუთხედის სიმძიმის ცენტრიდან, ამასთან ეს გადაადგილება განისაზღვრება $I_0 Z_0$ ვექტორით ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 173-ზე.



ნახ. 172.



ნახ. 173. ძაბვების დიაგრამა შერთებისას: ვარსკვლავი-ვარსკვლავი დაწინააღმდეგობის ნეიტრალური წერტილით.

იმის შემდეგ, რაც ნაპოვნია პირველადი ფაზური ძაბვების მნიშვნელობა, მეორადი ფაზური ძაბვები შეიძლება განსაზღვრულ იქნეს გრაგნილებში აბების გარანტიებიდან:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A - I_A Z_1 + I_a' Z_2 + I_0 Z_2 &= \dot{U}_A - I_A Z_k + I_0 Z_2 = -\dot{U}_a, \\ \dot{U}_B - I_B Z_k + I_0 Z_2 &= -\dot{U}_b, \\ \dot{U}_C - I_C Z_k + I_0 Z_2 &= -\dot{U}_c. \end{aligned} \right\} (14,34)$$

ნეიტრალური გამტარის დატვირთვის დროს Φ_0 ნაკადის და E_0 ე. მ. ძ-ის აოსებობა ზღუდავს Y/Y_0 სქემის გამოყენების შესაძლებლობას. ნულოვანი შიმდევრობის დენების მიერ შექმნილი არეები ზეთის ავზის კედლებში იწვევს დამატებით დანაკარგებს და გახურებას; E_0 ე. მ. ძ. ძალზე ამახინჯებს, ფაზური ძაბვების ვარსკვლავს. ამ მიზეზით OCT-ის თანახმად გრაგნილების Y/Y_0 სქემით შეერთებისას დენი ნეიტრალურ გამტარში არ უნდა აღემატებოდეს გრაგნილის ნომინალური დენის 25%-ს.

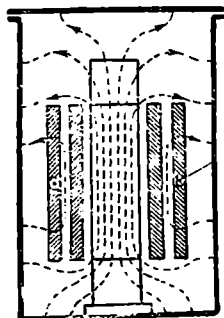
გრაგნილების Y/Y_0 სქემით შეერთებისათვის არასიმეტრიულობის ზღვრულ შემთხვევას წარმოადგენს ერთი ფაზის მოკლედ შერთვა ნეიტრალურ გამტართან, დანარჩენი ორი ფაზის ხაზური გამტარების გაწყვეტის ან გამორთვის პირობებში ისე, როგორც ეს სქემატურად, ნაჩვენებია ნახ. 175-ზე. საანგარიშო განტოლებებში ჩავსვით მნიშვნელობები

$$\begin{aligned} I_b &= I_c = 0, \\ I_0 &= \frac{I_a + I_b + I_c}{3} = \frac{I_a}{3}, \end{aligned}$$

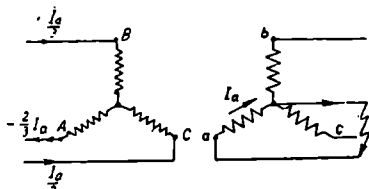
მაშინ (14,25) და (14,26)-დან მივიღებთ:

$$I_A = -I_a' = -\frac{2}{3}I_a, \quad I_B = -I_b' = \frac{1}{3}I_a, \quad I_C = -I_c' = \frac{1}{3}I_a.$$

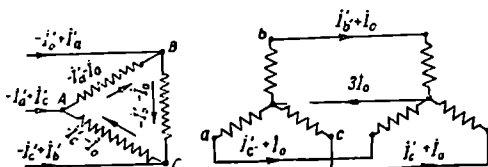
მიუხედავად იმისა, რომ მეორადი მხრიდან დატვირთულია მხოლოდ ერთი ფაზა, პირველად მხარეზე დენი გადის ყველა სამ ფაზაში, ამასთან მოკლედ შერთული ფაზის დენი წარმოადგენს დანარჩენი ორი ფაზის დენების უკუდენს.



ნახ. 174. ნულოვანი მიმდევრობის დენების არეზე ხეტიან ტრანსფორმატოროში.



ნახ. 175. ასიმეტრიულობის ზღვრული შემთხვევა, გრაგნილების Y/Y_0 სქემით შეერთების დროს.



ნახ. 176. დენების განაწილება შეერთების სქემის დროს: სამკუთხედი-ვარსკვლავი დამიწებული ნეიტრალური წერტილით.

როგორც ნახ. 175-დან ჩანს თვითეულ ღეროზე გაუწონასწორებელია დენი $I_0 = \frac{I_a}{3}$, ეს დენი არის რა დამამაგნიტებელი, ქმნის Φ_0 მაგნიტურ ნაკადს და E_0 ე. მ. ძ-ს, რომელიც ამახინჯებს ფაზური ძაბვების ვარსკვლავს.

ვ) პირველადი გრაგნილის შეერთება სამკუთხედად, მეორადის—ვარსკვლავად დამიწებული ნეიტრალური წერტილით. გრაგნილების მოცემული სქემით შეერთების დროს (ნახ. 176), ტრანსფორმატორის მეორად მხარეზე პირობები ისეთივეა, როგორც წინა შემთხვევაში, ამიტომ მეორადი დენებისათვის საშარტლიანია (14,25) ტოლობები.

რაც შეეხება პირველად გრაგნილს, მისი სამკუთხედად შეერთების შემთხვევაში, მასში ნორმალურად ტრანსფორმირებული იქნება არა მარტო დენები I_a' , I_b' , I_c' , არამედ I_0 დენიც, რადგან შეკრული სამკუთხედი მისთვის

გამტარ კონტურს წარმოადგენს. ამროგად, პირველად ფაზური დენებისათვის საშარტლიანია ტოლობები:

$$\left. \begin{aligned} I_{A\phi} &= -I_a = (I_a' + I_a), \\ I_{B\phi} &= -I_b = -(I_b' + I_b), \\ I_{C\phi} &= -I_c = -(I_c' + I_c). \end{aligned} \right\} \quad (14,35)$$

პირველადი ხაზური დენები განისაზღვრება, როგორც ფაზური დენების სხვაობა:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{A\phi} - I_{C\phi} = -I_a' + I_c', \\ I_B &= I_{B\phi} - I_{A\phi} = -I_b' + I_a', \\ I_C &= I_{C\phi} - I_{B\phi} = -I_c' + I_b'. \end{aligned} \right\} \quad (14,36)$$

როგორც (14,36) ტოლობები გვიჩვენებს, I_0 დენი ეცრკულირებს ჩაკეტულ სამკუთხედში, ისე რომ არ ხვდება ხაზში. მაგრამ Y/Y_0 შეერთების შემთხვევისაგან განსხვავებით I_0 დენი მაგნიტურად გაწონასწორებულია, რადგან პირველად გრაგნილში გადის მისი ტოლი და საწინააღმდეგოდ მიმართული დენი $-I_0$.

ამიტომ Δ/Y_0 შეერთების შემთხვევაში, გაცილებით ნაკლები იქნება ნიტრალის გადაადგილება და ფაზური ძაბვების დიშაზინჯება არასიმეტრიული დატვირთვის დროს.

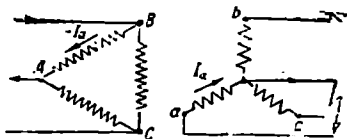
პირველად და მეორად ფაზურ ძაბვებს შორის დამოკიდებულება განისაზღვრება (14,15) ტოლობებით:

არასიმეტრიის ზღვრულ შემთხვევაში, როდესაც მაგალითად, $I_b = I_c = 0$ და $I_a = 3I_0$ (ნახ. 177), თანახმად (14,35)-ისა მივიღებთ:

$$I_{A\phi} = -I_a = -3I_0, \quad I_{B\phi} = I_{C\phi} = 0,$$

ე. ი. დენი პირველად მხარეზე გადის აგრეთვე ერთ ფაზაში.

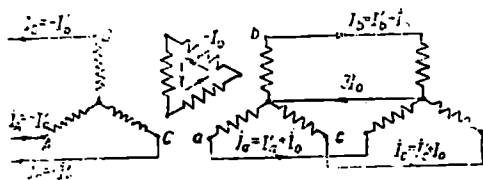
ზ) გრაგნილების შეერთება სქემით Y/Y_0 , სამკუთხედად ჩაკეტულ ხაკომპენსაციო გრაგნილით. ზემოთ განხილულიდან სჩანს, რომ Δ/Y_0 შეერთებას, შედარებით Y/Y_0 შეერთებასთან, აქვს რიგი უპირატესობებისა. Δ/Y_0 შეერთებისას არა მარტო მცირდება არასიმეტრიულობა ერთფაზა დატვირთვის დროს, არამედ უზრუნველყოფილია აგრეთვე ფაზური ე. მ. ძ მის სინუსოიდურობა. ზოგიერთ შემთხვევაში მალაძაბვიან მძლავრ ტრანსფორმატორებში, გრაგნილების იზოლაციის მოსაზრებით მაინც სასურველი არის ხოლმე ტრანსფორმატორის შესრულება Y/Y_0 —სქემით. ამგვარი ამოცანა შეიძლება გადაწყვეტილ იქნეს სამკუთხედად შეერთებულ ეგრეთწოდებულ სა-



ნახ. 177. არასიმეტრიულობის ზღვრული შემთხვევა შეერთების დროს: სამკუთხედი-ვარსკვლავი დამიწებული ნიტრალური წერტილით.

საკომპენსაციო გრაგნილის გამოყენებით. ასეთი ტრანსფორმატორის სქემა ნაჩვენებია ნახ. 178-ზე, როგორც ამ სქემიდან ჩანს საკომპენსაციო გრაგნილში გაივლის ნეორადი გრაგნილის ნულოვანი მიმდევრობის დენის ტოლი და საწინააღმდეგო დენი და აგრეთვე სამმაგი სიხშირის დამამაგნიტებელი დენი, რომელიც უზრუნველყოფს მთავარი მაგნიტური ნაკადის სინუსოიდურობას.

მეორადი დენების I_a' ,



ნახ. 178. დენების ვანაწილება შერათების სქემისათვის; Y, Y_0 საკომპენსაციო გრაგნილით.

I_b', I_c' მეორე მდგენელი ნორმალურად იქნება ტრანსფორმირებული პირველად გრაგნილში. Φ_0 მაგნიტური ნაკადის მცირე მნიშვნელობის გამო, ფაზური ძაბვების ვარსკვლავის დამახინჯება ნულოვანი გამტარის დატვირთვის შემთხვევაში უმნიშვნელო იქნება.

საკომპენსაციო გრაგნილი გამოთვლილი უნდა იქნას მისთვის მაქსიმალურად შესაძლო დენზე. ფაზის, მაგალითად a , მოკლედ შერთვის და, b და c ფაზების გაწყვეტის შემთხვევაში ნულოვანი მიმდევრობის დენი ტოლია:

$$\dot{I}_0 = -\frac{\dot{I}_a + 0 + 0}{3} = -\frac{\dot{I}_a}{3}.$$

მაშასადამე, მოკლედ შერთვის დროს გახურების პირობების მიხედვით საკომპენსაციო გრაგნილის სიმძლავრე უნდა გათვლილი იყოს, მუშა გრაგნილის სიმძლავრის ერთ მესამედზე.

სამკუთხედად ჩაკეტილი გრაგნილი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სასარგებლო დატვირთვისათვისაც. ამ შემთხვევაში მიიღება ჩვეულებრივი სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორი.

თ) ნულოვანი მიმდევრობის წინააღმდეგობა. ტრანსფორმატორის არასიმეტრიული დატვირთვის შემომოყვანილი ანალიზიდან გამომდინარეობს, რომ მეორადი გრაგნილის Y_0 სქემით შერთვისა და ნულოვანი გამტარის დატვირთვის დროს ყოველთვის აღიძვრება ე. მ. დ. ტოლი

$$\dot{E}_0 = -\dot{I}_0 Z_0.$$

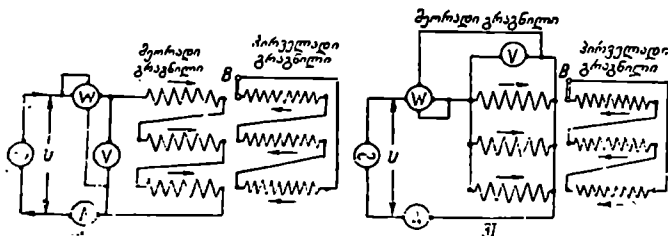
ამგვარად, Z_0 წინააღმდეგობა, ხოლო ზოგიერთ შემთხვევაში წინააღმდეგობა $Z_0 + Z_2 = Z_N$, განსაზღვრავს ფაზური ძაბვების სისტემის დამახინჯებას და იმ დამატებით დანაკარგებს, რომლებიც შეიქმნება ნულოვან მიმდევრობის დენების არეს მიერ.

წინააღმდეგობა Z_N წარმოადგენს ტრანსფორმატორის ნულოვან მიმდევრობის წინააღმდეგობას.

ტრანსფორმატორის არასიმეტრიული მუშაობის ანალიზის დროს აუცილებელია ამ წინააღმდეგობის ცოდნა და უნდა შეგვეძლოს მისი განსაზღვრა. ერთ-

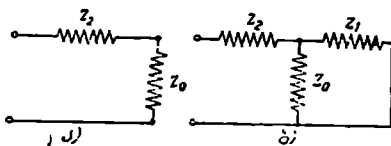
ფაზა ტრანსფორმატორების სამფაზა ჯგუფის შემთხვევაში ყოველ ფაზას აქვს დამოუკიდებელი მაგნიტური სისტემა, ამიტომ გრაგნილების Y/Y_0 შეერთების დროს ნულოვანი მიმდევრობის დენებით შექმნილი არეს ინდუქციური ხაზები გადის იმავე გზით, რომლითაც გადის მთავარი არეს ინდუქციური ხაზები. ე. ი. შეიკვრება გულანით. ამ შემთხვევაში ნულოვანი მიმდევრობის წინააღმდეგობის განთვლა უკმა სვლის წინააღმდეგობის განსაზღვრის ანალოგიურია, ამავე დროს წინააღმდეგობა Z_H ძლიერ არის დამოკიდებული მაგნიტური სისტემის გაელენთაზე.

სამღეროვან ტრანსფორმატორში Y/Y_0 შეერთების დროს ერთფაზა არეს ინდუქციური ხაზები გადის ნაწილობრივ გულანაში, ნაწილობრივ განმამხოლოებელ გარემოში, სახურავეში აუზის კედლებში და ა. შ. (ნახ. 174). ასეთი არაერთგვაროვანი კონტურის მაგნიტური წინააღმდეგობის ზუსტად აღრიცხვის სიძნელის გამო ნულოვანი მიმდევრობის წინააღმდეგობის გამოთვლა გამძნელებულია. ამ შემთხვევაში იგი შეიძლება საიზოლოდ განზღვრულ იქნეს მხოლოდ ცდის საშუალებით. ამისათვის სამფაზა ტრანსფორმატორის გრაგნილებში გაატარებენ ერთფაზა დენს და გაზომივენ დენის და ძაბვის ფაზურ მნიშვნელობებს. გაზომვა შეიძლება ჩატარებულ იქნეს ნახ. 179-ის რომელიმე



ნახ. 179. სქემები ნულოვანი მიმდევრობის წინააღმდეგობის ცდის განსაზღვრისათვის.

ძეგმის მიხედვით. გრაგნილების Y/Y_0 სქემით შეერთების დროს, I_0 დენი არის მთლიანად დამამაგნიტებელი და პირველად გრაგნილში არ ტრანსფორმირდება, ამიტომ ცდა ჩატარებულ უნდა იქნეს გამორთულ B დენმკვეთის დროს. ამ შემთხვევაში Z_H წინააღმდეგობის განსაზღვრის ცდა წარმოადგენს უკმა სვლის ცდას, ამიტომაც მისთვის გამოიყენება ნახ. 180 ა-ზე გამოსახული უკმა სვლის შენაცვლების სქემა.



ნახ. 180. შენაცვლების სქემები ნულოვანი მიმდევრობის წინააღმდეგობისათვის: ა-გრაგნილები შეერთებულია სქემით Y/Y_0 ; ბ-გრაგნილები შეერთებულია სქემით Δ/Y_0 .

ცდის მონაცემებით შეიძლება განესაზღვროთ

$$Z_H = Z_0 + Z_2 = \frac{U}{I} \quad (14,37)$$

$$Z_0 = Z_H - Z_2 \approx Z_H - \frac{Z_H}{2}. \quad (14,38)$$

სამღეროვან ტრანსფორმატორში ნომინალური დენის ნამრავლი Z_H წინააღმდეგობაზე ჩვეულებრივად შეადგენს ნომინალურა ფაზური ძაბვის 30-დან 100%-მდე.

თუ ნულოვანი მიმდევრობის დენი გადის პირველად გრაგნილშიაც, მაშინ ცდა ჩატარებულ უნდა იქნეს ჩართულ B დენმკვეთის დროს. ამ შემთხვევაში ცდა თავისი ხასიათით წარმოადგენს მოკლედ შერთვის ცდას, რომელიც უბასუხებს ნახ. 180, ბ-ზე მოცემულ შენაცვლების სქემას, სადაც Z_0 შეესაბამება Z_{12} -ს. დაუშვებთ რა, რომ ფანტვის ინდუქტიობა, რომელიც განისაზღვრება ნულოვანი მიმდევრობის დენით, მცირედ განსხვავდება ტრანსფორმატორის ფანტვის ჩვეულებრივ ინდუქტიობისაგან, ცდების მონაცემებით ვპოულობთ:

$$\frac{\dot{U}}{I} = Z'' = Z_2 + \frac{Z_1 Z_0}{Z_1 + Z_0} = Z_2 + \frac{Z_1}{\frac{Z_1}{Z_0} + 1} \quad (14,39)$$

ვინაიდან $\frac{Z_1}{Z_0}$ გაცილებით ნაკლებია ერთზე, ამიტომ საკმარისი სიზუსტით შეიძლება ჩავთვალოთ

$$Z'' \approx Z_1 + Z_2 \approx Z_H, \quad (14,40)$$

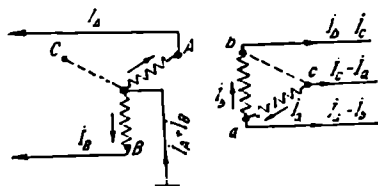
ე. ი. რომ სამკუთხედად ჩაკეტილ გრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ნულოვანი მიმდევრობის წინააღმდეგობა დაახლოებით ტოლია მეორად გრაგნილსა და სამკუთხედად ჩაკეტილ გრაგნილს შორის მოკლედ შერთვის წინააღმდეგობისა.

ე) ტრანსფორმატორის მუშაობა ერთი ფაზის გამორთვის დროს. თუ სამფაზა ტრანსფორმატორში გამოვრთავთ ერთ ფაზას, მაშინ გრაგნილების შეერთების სქემის მიხედვით დარჩენილი ორი ფაზა ქმნის „ღია სამკუთხედს“ ან „ორსხივიან ვარსკვლავს“. ტრანსფორმატორის მუშაობა ასეთ პირობებში წარმოადგენს პრაქტიკულ ინტერესს განსაკუთრებით ერთფაზა ტრანსფორმატორების სამფაზა ჯგუფისათვის: ერთი ტრანსფორმატორის ავარიის შეკბხვევაში ორ დარჩენილ ფაზას შეუძლია განაგრძოს მუშაობა დაზიანებული ფაზის აღდგენამდე.

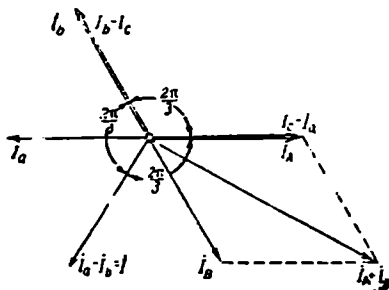
საბჭოთა კონსტრუქციის დიდი სიმძლავრის ტრანსფორმატორებში, რომლებიც მუშაობენ სამფაზა ჯგუფში. გრაგნილები შეერთდება Y/Δ სქემით. სსრკავშირის ენერგოსისტემებში ტრანსფორმატორები ჩვეულებრივად მუშაობენ დამიწებული ნეიტრალით, ამიტომ პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს (ნახ. 181)-ზე მოცემული სქემით შეერთებულ ტრანსფორმატორის მუშაობის გამოკვლევას „ორსხივიანი ვარსკვლავი“ დამიწებული ნეიტრალით—„ღია სამკუთხედი“.

დაეუშვათ, რომ პირველადი გრაგნილი შეერთებულია „ორსხივიან ვარ-

აკვლავად“ დამიწებული ნეიტრალით, ხოლო მეორადი „ლია სამკუთხედად“ ვინაიდან პირველადი ფაზური ძაბვები კმნის, ძაბვების სიმეტრიული ვარსკვლავის ორ სხივს, მეორად მხარეზეც, აუ უგულვებელფყოთ ძაბვის ვარდნას



ნახ. 181. დენების განაწილება შერტე-
ბისას: „ორსხივიანი ვარსკვლავი“ და-
მიწებული ნეიტრალით—ლია სამ-
კუთხედი“.



ნახ. 182.

ტრანსფორმატორში, შენარჩუნებულ უნდა იქნეს ძაბვების სიმეტრიული სამ-
კუთხედი ab, bc, ca , ამიტომ სიმეტრიულ სამფაზა დატვირთვის დროს მე-
ორადი ხაზური დენები ასევე კმნიან სიმეტრიულ სამფაზა სისტემას.

ნახ. 181-ის თანახმად ჩვენ უნდა ჩავთვალოთ

$$I_c = -I_b = 0. \quad (14,41)$$

მაშინ მეორადი ხაზური დენებისათვის მიღებული იქნება შემდეგი განო-
სახულებები:

$$\left. \begin{aligned} I_a - I_b &= I, \\ I_b - I_c &= I_b = I = I_c e^{-j\frac{2\pi}{3}} \\ I_c - I_a &= -I_a = I e^{-j\frac{4\pi}{3}} \end{aligned} \right\} \quad (14,42)$$

მეორადი ფაზური დენები ნორმალურად ტრანსფორმირდება პირველად
მხარეზე, ამიტომ

$$\left. \begin{aligned} I_A &= -I_a = I e^{-j\frac{4\pi}{3}} \\ I_B &= -I_b = -I e^{-j\frac{2\pi}{3}} \end{aligned} \right\} \quad (14,42)$$

ამ დროს ნეიტრალურ ვაბტარში გაივლის დენი

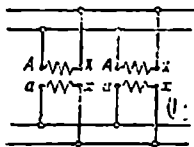
$$I_A + I_B = I \left(e^{-j\frac{4\pi}{3}} - e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right) = I \sqrt{3}. \quad (14,44)$$

დენების სათანადო ვექტორული დიაგრამა მოყვანილია ნახ. 182-ზე.

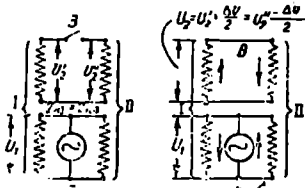
უნდა აღინიშნოს, რომ ტრანსფორმატორის მუშაობის ასეთი რეჟიმში შეიძლება დაშვებულ იქნეს მხოლოდ ავარიულ პირობებში, ვინაიდან ნულოვანი წერტილის დამიწება არ გაიანგარიშება დიდი დენის ხანგრძლივად გატარებაზე.

15. ტრანსფორმატორების პარალელური მუშაობა

ტრანსფორმატორების პარალელურად ჩართვის ქვეშ იგულისხმება მათი ისეთი ჩართვა, როდესაც პირველადი და მეორადი გრაგნილები ცალ-ცალკე მიუერთდება პარალელურად საერთო საღებებს, როგორც ეს სქემატურად ნახ. 183-ზეა გამოსახული. ტრანსფორმატორების პარალელურად ჩართვა იხმარება იმ შემთხვევებში, როდესაც სიმძლავრის დანაწილება ეკონომიურად. მანანსწერილია ქვესაღურის დატვირთვის გრაფიკის ცვალებადობის გამო-



ნახ. 183. ტრანსფორმატორების პარალელურ მუშაობაზე ჩართვის სქემა.



ნახ. 184. განსხვავებული ტრანსფორმატორის კოფეციენტებიანი ორი ტრანსფორმატორის ჩართვა პარალელურ მუშაობაზე.

ამ შემთხვევებში მინიმალური დატვირთვის დროს მუშაობს ერთი ტრანსფორმატორი და დატვირთვის ზრდასთან ერთად მიუერთდება დანარჩენები. პარალელური მუშაობა საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ დენის და ძაბვის ტრანსფორმირებასთან დაკავშირებული, აქტიური და რეაქტიული ენერჯის დანაკარგები.

ტრანსფორმატორების ნორმალური პარალელური მუშაობისათვის საჭიროა:

- 1) ტრანსფორმატორების პირველადი და მეორადი ნომინალური ძაბვების ტოლობა;
- 2) გრაგნილების შეერთების ჯგუფების იგივეობა;
- 3) მოკლედ შერთვის ძაბვების ტოლობა.

პარალელური მუშაობის გამოკვლევის დროს აუცილებელია გამოვარჯიოთ, როგორ განაწილდება დატვირთვის საერთო დენი პარალელურად ჩართულ ტრანსფორმატორებს შორის.

ა) პირველადი და მეორადი ძაბვების ტოლობის პირობა. ამ პირობის მნიშვნელობის გამოსარკვევად მივმართოთ ნახ. 184-ს, რომელზედაც სქემატურად გამოსახულია სხვადასხვა ტრანსფორმაციის კოფეციენტების მქონე ორი ტრანსფორმატორი. სიმარტივისათვის გამოსახული ტრანსფორმატორები ერთფაზია. მიღებულია აგრეთვე, რომ $Z_{I1} = Z_{II1} = Z_k$.

ვინაიდან ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი $k_I \neq k_{II}$, ამიტომ ორივე ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილების \dot{U}_1 ძაბვაზე ჩართვის დროს (ნახ. 184, ა) მათ მეორად გრაგნილებს ექნებათ ფაზით თანხვედნილი, მაგრამ ამპლიტუდით განსხვავებული \dot{U}_2' და \dot{U}_2'' ძაბვები. თუ ამ პირობებში ჩაერთავთ B ამომრთველს (ნახ. 184, ბ), მაშინ ძაბვების ჯამის¹ $\dot{U}_2' + \dot{U}_2'' = \Delta \dot{U}$ მოქმედების შედეგად ორივე ტრანსფორმატორის მიერ შექმნილ კონტურში, აღიძვრება გამათანასწორებელი დენი, რომლის მნიშვნელობა შეიზღუდება ორივე ტრანსფორმატორის, მიმდევრობით ჩართულ სრული შინაგანი წინააღმდეგობებით:

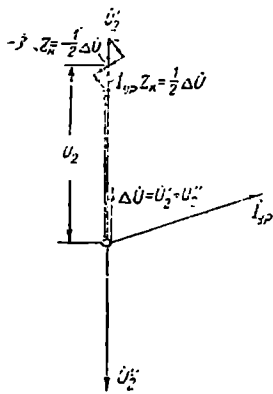
$$\dot{I}_{\Sigma P} = \frac{\Delta \dot{U}}{Z_{kI} + Z_{kII}} = \frac{\Delta \dot{U}}{2Z_k} \quad (15, i)$$

ტრანსფორმატორებში დენი $\dot{I}_{\Sigma P}$ გაივლის საწინააღმდეგო მიმართულე ბეჭით, ამ დროს ტრანსფორმატორებში წარმოიშვება ძაბვის შინაგანი ვარდნები, ტოლი ერთში $\dot{I}_{\Sigma P} Z_k = \frac{\Delta \dot{U}}{2}$ და მეორეში $-\frac{\Delta \dot{U}}{2}$. შედეგად მეორადი გრაგნილების მომქერებზე დაშვარდება ორივე ტრანსფორმაციისათვის საერთო ძაბვა

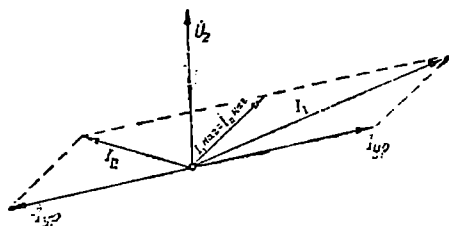
$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2' - \frac{\Delta \dot{U}}{2} = -\dot{U}_2'' + \frac{\Delta \dot{U}}{2},$$

ან

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_2' - \frac{\Delta \dot{U}}{2} = \dot{U}_2'' + \frac{\Delta \dot{U}}{2}.$$



ნახ. 185.



ნახ. 186. განსხვავებული ტრანსფორმაციის კოეფიციენტებიანი ორი პარალელურად მომუშავე ტრანსფორმატორის დენების ვექტორული დიაგრამა დატვირთვის დროს.

ნახ. 185-ზე ნაჩვენებია ამ შემთხვევის შესაბამისი ვექტორული დიაგრამა.

¹ ძაბვები \dot{U}_2' და \dot{U}_2'' ფაზით თანხვედნილია, ე. ი. ყოველ მთავრულ მომენტში ორივე გრაგნილში ერთნაირად არის მიმართული, მაგალითად, დასაწყისიდან ბოლოსაყენ ან პირიქით ამიტომ მეორადი გრაგნილების მიერ შექმნილ კონტურში, ძაბვები \dot{U}_2' და \dot{U}_2'' მოქმედებს ერთმანეთის შენხვედრად და კონტურის თვალსაზრისით დაძრულია 180°-ით. მათი გეომეტრიული ჯამი კონტურში ტოლია მათი არითმეტიკული სხვაობის.

ტრანსფორმატორების გრაგნილებში გამავალი გამათანასწორებელი დენი, სასარგებლო დატვირთვის არსებობისაგან დამოუკიდებლად, იწვევს ზედმეტ დანაკარგებს და გრაგნილების ვახუფებას უქმი სვლის დროსაც კი, ამავე დროს შედარებით მცირე განსხვავებამ ტრანსფორმატიის კოეფიციენტებში შეიძლება განიწიოს მნიშვნელოვანი გამათანასწორებელი დენები.

მაგალითი. ერთი და იგივე მოკლედ შერთვის ძაბვების $e_k = 5\%$ მქონე, ორი ერთნაირი სიმძლავრის ერთთაზა ტრანსფორმატორის მეორადი ძაბვები განსხვავდება ერთი მეორისაგან 2% -ით. განვსაზღვროთ გამათანასწორებელი დენის ფარდობითი წინიწეგლობა ტრანსფორმატორების პარალელურად ჩართვის დროს.

გვაქვს

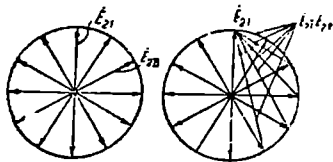
$$I_N = \frac{e_k}{100} \frac{U_N}{Z_k}, \quad I_{np} = \frac{\Delta U\%_0}{100} \frac{U_N}{2Z_k},$$

საიდანაც

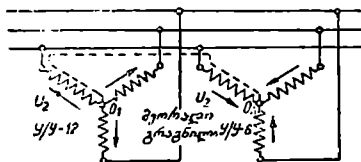
$$\frac{I_{np}}{e I_N} = \frac{\Delta U\%_0}{2e_k} = \frac{2}{2 \times 5} = 0,2,$$

ე. ი. განათანასწორებელი დენი შეადგენს ნომინალური დენის 20% -ს,

პარალელურად მომუშავე სხვადასხვა ტრანსფორმატიის კოეფიციენტების მქონე ტრანსფორმატორების დატვირთვის დროს, გამათანასწორებელმა დენმა, ზედ დაედება რა დატვირთვის დენს, შეუძლია გამოიწვიოს ერთ-ერთი ტრანსფორმატორის გადატვირთვა. დაუშვათ, რომ საერთო დატვირთვაზე პარალელურად მომუშავე, განსხვავებული ტრანსფორმატიის კოეფიციენტებიანი ორი ტრანსფორმატორი შერჩეულია იმგვარად, რომ დატვირთვით განპირობებული მათი დენები ტოლია და თანხვდენილია ფაზით.



ნახ. 187. მეორად ბახურ ე. მ. ძ-ბის ვექტორებს შორის ფაზათა შესაძლო ძვრა.



ნახ. 188. გრაგნილების Y/Y—6 და Y/Y—12 ჯგუფით შერთებული ორი ტრანსფორმატორის პარალელურად ჩართვა.

მაშინ თითოეული ტრანსფორმატორის რეზულტიური დენი, გამათანასწორებელი და დატვირთვის დენების გეომეტრიული ჯამის ტოლი იქნება. როგორც ნახ. 186-დან ჩანს, ამ შემთხვევაში შესაძლებელია ერთი ტრანსფორმატორის დიდად გადატვირთვა, მაშინ, როდესაც მეორე მნიშვნელოვნად დაუტვირთავია, ე. ი. პარალელური მუშაობის პირობები იქნება არანორმალური.

ბ) გრაგნილების შეერთების ჯგუფების იგივეფობის პირობა. II ნაწილის, § 9, 3-ში დადგენილი იყო, რომ სამუაზა ტრანსფორმატორის გრაგნილების შეერთების ჯგუფის მიხედვით მეორადი ხაზური ე. მ. ძ-ის ვექტორი შეიძლება იყოს დაძრული პირველადი ე. მ. ძ-ის ვექტორის მიმართ 30° -ის ჯერადა ნებისმიერი კუთხით. შეერთების ჯგუფის მიუხედავად პირველადი ძაბვები ტრანსფორმატორებისა, რომლებიც იკვებება საერთო წყაროდან, ყოველთვის თანხედენილია ფაზით. ამის გარდუვალ შედეგს, სხვადასხვა შეერთების ჯგუფების მქონე ტრანსფორმატორების პარალელურად მუშაობის შემთხვევაში, წარმოადგენს მათი მეორადი ძაბვების ფაზით დაძვრა. ტრანსფორმატორების მეორად ერთსახელა მომქერებს შორის იმოქმედებს ე. მ. ძ. რომელიც ტოლია ტრანსფორმატორების მეორადი ე. მ. ძ-ების ვექტორების ახვობის (იხ. 187). ეს კი, როგორც უკვე ვიცით, წარმოადგენს გამათანასწორებელი დენის წარმოშობის პირობას.

მაგალითისათვის გამოვიყვილით, როგორი იქნება ორი საეგებით ერთნაირი პარამეტრების მქონე ტრანსფორმატორის უკმ სვლაზე პარალელურად ხართვის შედეგები. თუ ერთ მათგანს აქვს შეერთების ჯგუფი Y/Y_0--12 , ხოლო მეორეს— Y/Y_0--6 . იხ. 188-ის თანახმად ტრანსფორმატორების O_I და O_{II} ნულოვან წერტილებს შორის იმოქმედებს ძაბვა $U_2 - (-U_2) = 2U_2$, ვინაიდან ორივე ტრანსფორმატორის მეორადი ძაბვები დაძრულია 180° -ით.

ამიტომ განათანასწორებელი დენი ტოლი იქნება $I_{\text{წრ}} = \frac{2U_2}{2Z_{\text{კ}}} = I_{\text{კ}}$, ე. ი.

მოკლედ შერთვის სრული დენის.

მეორადი ძაბვების ფაზათა უფრო მკირე ძერის დროს გამათანასწორებელი დენი აღწევს ასევე დიდ მნიშვნელობებს, რომლებიც რამდენიმეჯერ აკარბებენ ნომინალურ დენს. აქედან გაომდინარეობს, რომ ტრანსფორმატორების პარალელურ მუშაობაზე ჩართვა დასაშვებია მხოლოდ იმ შემთხვევებში, როდესაც ნებისმიერ ჩაკეტილ კონტურში, რომელიც შეიქნება პარალელურად შეერთების დროს, ე. მ. ძ. ჯამი ტოლია ნულის. იმისათვის, რომ ყოველთვის არ მოვახდინოთ ამ პირობის შესრულების შესაძლებლობის ანალიზი, პარალელურად შეერთების დროს შეიძლება ვიხელმძღვანელოთ შემდეგი ცხრილით (იხ. ცხრ. 12).

ძირითადი ჯგუფის ტრანსფორმატორის—მაგალითად 12-ის წარმოებულის ჯგუფის—მაგალითად 4, ტრანსფორმატორთან პარალელურად შეერთებისათვის, აუცილებელია წინასწარ მომქერების დასახელების წრიული გადახაცვლების გზით უკანასკნელი გადავაციოთ ძირითადი ჯგუფის ტრანსფორმატორად.

გ) მოკლედ შერთვის ძაბვების ტოლობის პირობა. „ა“ და „ბ“ პარაგრაფებში განხილულ. პირველი ორი პირობის დაცვისას მოკლედ შერთვის ძაბვები და მათი აქტიური და რეაქტიული მდგენელება განსაზღვრავს თი-

ჯგუფი	12 (4,3)	6 (10,2)	5 (9,1)	11 (3,7)
12 (4,8)	შესაძ- ლოა	შეუძლე- ბელია	შეუძლე- ბელია	შეუძლე- ბელია
6 (10,2)	შეუძლე- ბელია	შესაძ- ლოა	შეუძლე- ბელია	შეუძლე- ბელია
5 (9,1)	შეუძლე- ბელია	შეუძლე- ბელია	შესაძ- ლოა	შესაძ- ლოა
11 (3,7)	შეუძლე- ბელია	შეუძლე- ბელია	შესაძ- ლოა	შესაძ- ლოა

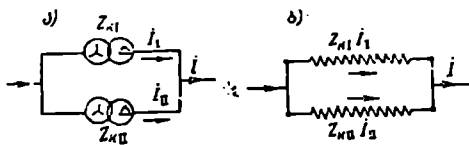
შენიშვნები

ნე-5 და მე-11 ჯგუფების ტრანსფორმატორების პარალელური მუშაობა შესაძლებელია მხოლოდ მომენტების შემდეგი თანმიმდევრობით შეერთებისას:

ჯგუფი	მე	დმ
5	ABC	abc
11	ACB	cba
	CBA	bac
	BAC	acb

შესაძლოა—პარალელური მუშაობა შესაძლოა
შეუძლებელია— " " შეუძლებელია

თ ოველი ტრანსფორმატორის დატვირთვის მათი პარალელურად მუშაობის



ნახ. 189. ორი ტრანსფორმატორის საერთო დატვირთვაზე პარალელური მუშაობის სქემა.

შემთხვევაში. ამის გამოსარკვევად განვიხილოთ ნახ. 189, ა-ზე ორი ტრანსფორმატორის სქემა, რომლებიც პარალელურად მუშაობენ საერთო დატვირთვაზე. ეს სქემა გამოდგება, როგორც ერთფაზა, ასევე სამ-

ფაზა ტრანსფორმატორებისათვის. უკანასკნელ შემთხვევაში პარალელური მუშაობის საკითხების გამოკვლევისათვის, საკმარისია დაკმაყოფილდეთ ერთი ფაზით, ვინაიდან ყველა ფაზებში მოვლენები ერთნაირად მიმდინარეობს. ნახ. 189, ა-ზე ნაჩვენებ სქემა შეგვიძლია შევცვალოთ გამოკვლევისათვის უფრო თვალსაჩინო სქემით (ნახ. 189, ბ), ამასთან ჩავთვალოთ, რომ ტრანსფორმატორებს აქვს ერთნაირი პირველადი და მეორადი ნომინალური ძაბვები და ამიტომ გამოათანასწორებელ დენებს უქმი სელის დროს ადვილი არ ექნება:

ნახ. 189, ბ-ზე ნოცემულ სქემიდან გამომდინარეობს რომ:

$$I_I Z_{bI} = I_{II} Z_{bII} \tag{15,2}$$

აბ

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{bII}}{Z_{bI}} \tag{15,3}$$

თუ ϵ_1 - მოკლედ შერთვის ძაბვის საშუალებით, გამოვსახავთ Z_{ϵ_1} და $Z_{\epsilon_{II}}$ მოკლედ შერთვის წინააღმდეგობებს, მივიღებთ:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{\epsilon_{II}}{\epsilon_1} \frac{I_{\epsilon_1}}{I_{\epsilon_{II}}} \quad (15,4)$$

თუ (15,4) ტოლობის ორივე მხარეს გადავამრავლებთ, ორივე ტრანსფორმატორის საერთო ნომინალურ ძაბვაზე, მივიღებთ:

$$\frac{UI_I}{UI_{II}} = \frac{P_I}{P_{II}} = \frac{\epsilon_{II}}{\epsilon_1} \frac{P_{\epsilon_1}}{P_{\epsilon_{II}}} \quad (15,5)$$

(15,5) ტოლობა გვაჩვენებს, რომ ორი ტრანსფორმატორის პარალელური მუშაობის დროს დატვირთვა მათ შორის განაწილდება ნომინალური სიმძლავრეების პირდაპირპროპორციულად და მოკლედ შერთვის ძაბვების უკუპროპორციულად.

გაცემული სიმძლავრის შეფარდება ნომინალურ სიმძლავრესთან ახასიათებს ტრანსფორმატორის ფარდობით დატვირთვას. (15,5)-დან ვპოულობთ

$$\frac{P_I}{P_{\epsilon_1}} : \frac{P_{II}}{P_{\epsilon_{II}}} = \frac{1}{\epsilon_1} : \frac{1}{\epsilon_{II}} \quad (15,6)$$

(15,6) ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ სხვადასხვა მოკლედ შერთვის ძაბვების შემთხვევაში პარალელური მუშაობის დროს უფრო მაღე გადაიტვირთება ტრანსფორმატორი, რომელსაც აქვს ნაკლები მოკლედ შერთვის ძაბვა.

თუ მივიღებთ, რომ პარალელურად ზომუშავე ტრანსფორმატორებიდან არც ერთი არ უნდა იქნეს დატვირთული მის ნომინალურ სიმძლავრეზე უფრო მეტად, მაშინ, როგორც (15,5)-დან გამომდინარეობს, ნაკლები მოკლედ შერთვის ძაბვის, დაეუშვათ ϵ_1 -ს მქონე ტრანსფორმატორის სრული დატვირთვის დროს, (ე. ი. როდესაც $P_I = P_{\epsilon_1}$), მეორე ტრანსფორმატორის

დატვირთვა ტოლი იქნება $P_{II} = P_{\epsilon_{II}} \frac{\epsilon_1}{\epsilon_{II}}$ და ორივე ტრანსფორმატორის ფარდობითი ჯამური დატვირთვა შეადგენს:

$$\frac{P_I + P_{II}}{P_{\epsilon_1} + P_{\epsilon_{II}}} = \frac{P_{\epsilon_1} + P_{\epsilon_{II}} \frac{\epsilon_1}{\epsilon_{II}}}{P_{\epsilon_1} + P_{\epsilon_{II}}} = \frac{\epsilon_1 + \alpha}{1 + \alpha} \quad (15,7)$$

სადაც

$$\alpha = \frac{P_{\epsilon_1}}{P_{\epsilon_{II}}}$$

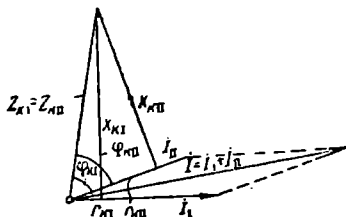
ჩვეულებრივად რეკომენდებულია პარალელურ მუშაობაზე ჩართულ იქნეს ტრანსფორმატორები, რომელთა მოკლედ შერთვის ძაბვები განსხვავებულია

არა უმეტეს $10''$ მაგალითად, თუ $\frac{\epsilon_{KI}}{\epsilon_{KII}} = 0,9$ და $\alpha = 1$, მაშინ (15,7)-ის თანახმად მივიღებთ:

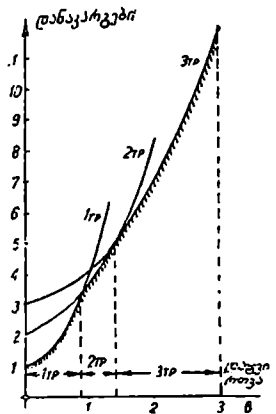
$$\frac{P_I + \hat{P}_{II}}{P_{HI} + P_{HII}} = \frac{0,9 + 1}{1 + 1} = 0,95,$$

ე. ი. ამ ზღვრულ შემთხვევაში პარალელური მუშაობის დროს იკარგება დადგმული სიმძლავრის 5% .

(15.6) გამოსახულება ადვილად შეიძლება განზოგადოებულ იქნეს პარალილურად მომუშავე ტრანსფორმატორების ნებისმიერი რიცხვისათვის. ცხადია, რომ n პარალელურად მომუშავე ტრანსფორმატორისათვის მივიღებთ:



ნახ. 19C. პარალელურად მომუშავე ტრანსფორმატორების r_K და x_K -ს გველენა დატვირთვის განაწილებაზე.



ნახ. 191. საერთო დანაკარგების შედარება პარალელურად მომუშავე ტრანსფორმატორების სხვადასხვა რიცხვის შემთხვევაში და სხვადასხვა დატვირთვისას.

$$\frac{P_I}{P_{HI}} : \frac{P_{II}}{P_{HII}} : \dots : \frac{P_n}{P_{Hn}} = \frac{1}{\epsilon_{KI}} : \frac{1}{\epsilon_{KII}} : \dots : \frac{1}{\epsilon_{Kn}} \quad (15,8)$$

ტრანსფორმატორების პარალელურ მუშაობაზე გარკვეულ გველენას ახდენს აგრეთვე ტრანსფორმატორების მოკლედ შერთვის წინააღმდეგობების (და ძაბვების) აქტიური და რეაქტიული მდგენელების თანაფარდობა. თუ ორი ტრანსფორმატორის პარალელური მუშაობის დროს $Z_{KI} = Z_{KII}$, მაგრამ $x_{KI} \neq x_{KII}$ და $r_{KI} \neq r_{KII}$ (ნახ. 190), მაშინ I_1 და I_2 დენებს შორის ადგილი ექნება ფაზების ძვრას, რომელიც განისაზღვრება კუთხით $\varphi_{KI} - \varphi_{KII}$. ეს გამომდინარეობს ტოლობიდან (15,2):

$$I_1 = I_{II} \frac{Z_{KII}}{Z_{KI}} = I_{II} \frac{Z_{KII}}{Z_{KI}} e^{j(\varphi_{KII} - \varphi_{KI})}. \quad (15,9)$$

კუთხეების უტოლობა $\varphi_{KI} \neq \varphi_{KII}$ შედეგად გვაძლევს იმას, რომ საერთო გაცემული სიმძლავრე ნაკლები იქნება ცალკეულ ტრანსფორმატორების სიმძლავრეების ჯამზე იმდენჯერ, რამდენჯერაც მათი დენების ვეომეტრიული ჯამი ნაკლებია არითმეტიკულზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ პარალელურად მომუშავე ტრანსფორმატორების დენებს შორის ფაზების ძვრის კუთხე ჩვეულებრივად ძლიერ მცირეა და ამიტომ მათი საერთო დენი შეიძლება დაახლოებით ჩაითვალოს დენების არითმეტიკული ჯამის ტოლად.

დ) ენერჯიის დანაკარგები პარალელური მუშაობის დროს. პარალელურად მომუშავე ტრანსფორმატორების საერთო დანაკარგების განსაზღვრის გზით შეიძლება გადაწყვიტოთ საკითხი იმ დატვირთვების შესახებ, რომელთა დროს მიზანშეწონილია ერთი ტრანსფორმატორის მუშაობიდან გადასვლა ორი ტრანსფორმატორის პარალელურ მუშაობაზე, ორის პარალელური მუშაობიდან სამის პარალელურ მუშაობაზე და ა. შ. დაეშვათ, გვაქვს სამი ერთნაირი პარალელურად მომუშავე ტრანსფორმატორი. თითოეული ტრანსფორმატორის სიმძლავრე მივიღოთ ერთეულად, დანაკარგების ფარდობა $P_k: P_0 = 3:1$. ნახ. 191-ზე მოცემულია ერთი, ორი და სამი ტრანსფორმატორის დანაკარგების მრუდები დატვირთვისაგან დამოკიდებულებით.

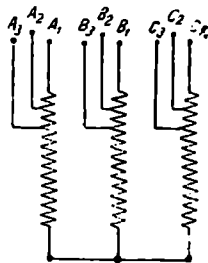
როგორც ამ მრუდებიდან ჩანს, განხილულ შემთხვევაში $\beta < 0,82$ დატვირთვის დროს საჭიროა ჩირთვის ერთი ტრანსფორმატორი. როდესაც $0,82 < \beta < 1,42$ ჩირთვის ორი ტრანსფორმატორი, ხოლო თუ $\beta > 1,42$ გადავიდეთ სამივე ტრანსფორმატორის პარალელურ მუშაობაზე.

16. ძაბვის რეგულირება

დატვირთვის რყევის დროს, ქსელის საჭირო ძაბვის შენარჩუნების მიზნით, ტრანსფორმატორებში გათვალისწინებულია მეორადი ძაბვის რეგულირების შესაძლებლობა. არსებობს ასეთი რეგულირების საშუალებების რიგი. რომელიც განხილულ იქნება ქვემოთ.

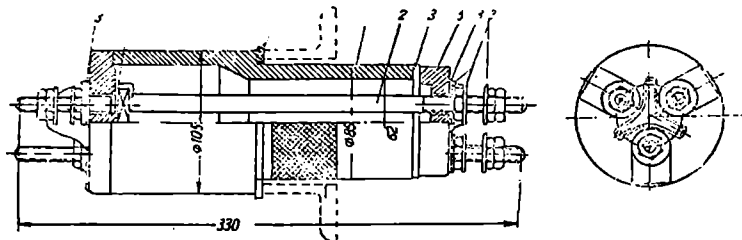
ა) რეგულირება დამატებით გამოყვანების საშუალებით. ძაბვის რეგულირების ყველაზე უფრო გავრცელებულ საშუალებას წარმოადგენს ერთ-ერთი გრაგნილის, უფრო ხშირად მაღალი ძაბვის გრაგნილის ხვევთა რიცხვის შეცვლა. ხვევთა რიცხვი ჩვეულებრივად იცვლება ნომინალურის 105-დან 95%/-მდე. მცირე ტრანსფორმატორებში ამ მიზნისათვის გრაგნილის ერთ-ერთი ბოლოდან აკეთებენ დამატებით გამოყვანებს, რომლებიც გამოიყვანება ტრანსფორმატორის ხუფზე. ნახ. 192-ზე ნაჩვენებია სამფაზა ტრანსფორმატორის გრაგნილის სქემა დამატებითი გამოყვანებით. გამოყვანების ღლიშენა შეესაბამება OCT-ს. ყოველი ფაზის სამივე გამოყვანი ჩვეულებრივად აიწყობა საერთო სამომოპერირიან იზოლატორზე. ასეთი იზოლატორი ნაჩვენებია ნახ. 193-ზე.

ბ) რეგულირება გადამრთველის საშუალებით. დიდ ტრანსფორმატორებში ძაბვის რეგულირების ზემოთ აღწერილი საშუალება არ გამოიყენება, ვინაიდან გრაგნილის ბოლოზე ხვევების გამორთვა ტრანსფორმატორის მოკლედ შერ-



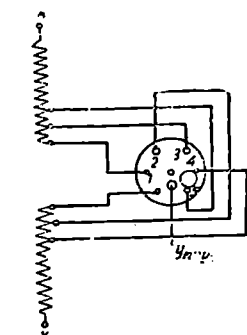
ნახ. 192. დამატებითი პარავლურიბელი გამოყვანებიანი გრაგნილის სქემა.

თვის დროს გრაგნილში ქმნის მნიშვნელოვან ღერძულ მექანიკურ ძალებს (უფრო დაწვრილებით იხ. ნაწილი II § 17). ასეთ ტრანსფორმატორებში სარეგულირებელი ხვევები მოთავსებულია გრაგნილის შუა ნაწილში, ხოლო



ნახ. 193. სამომკერიანი იზოლატორი. 1—ფაიფურის პერანგი; 2—დენგამტარი ღერო; 3—მუჯოს საყელური; 4—ზეთგამძლე რეზინის შემამკიდროებელი საყელური; 5—ფაიფურის ხუფი.

რეგულირება ხორციელდება სპეციალური გადამრთველის საშუალებით, რომელიც მოთავსებულია ტრანსფორმატორის ზეთიან ავზში გრაგნილთან უშუალო სიახლოეში, და მოქმედებაში მოიყვანება სპეციალური ბერკეტის ან მოწყვანის საშუალებით.



ნახ. 194. გადამრთველის საშუალებით ძაბვის რეგულირების სქემა.

ნახ. 194-ზე ნაჩვენებია ასეთ გრაგნილში რეგულირების სქემა, როდესაც რეგულირების საფეხურების რიცხვი ტოლია ხუთის. ყოველი დამატებითი გამოწყვანი დაკავშირებულია გადამრთველის გარკვეულ მომკერთან.

ნახ. 195-ზე ნაჩვენებია ერთფაზა ტრანსფორმატორი მასზე დადგმული გადამრთველით.

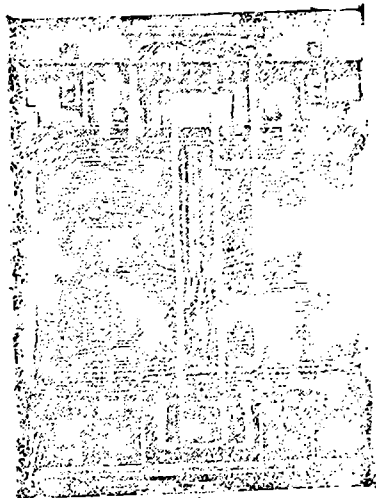
გ) ძაბვის რეგულირება დატვირთვის ქვეშ. იანსენის სქემა. ძაბვის რეგულირების ზემოთ აღწერილი საშუალებები ყოველთვის არაა მოხერხებული, ვინაიდან ისინი მოითხოვენ ტრანსფორმატორის წინასწარ გამორთვას, რაც დაკავშირებულია მომხმარებლის ელექტროენერგიით კვების შეწყვეტასთან. ელექტრული სისტემების ძაბვის და სიმძლავრის ზრდასთან ერთად სულ უფრო მეტ მნიშვნელობას იძენს ენერგიის მიწოდების

უწყვეტობა. ბევრ შემთხვევაში (მაგალითად, განათებითი დატვირთვის დროს) დღე-ღამის განმავლობაში გვიხდება ძაბვის მრავალჯერადი რეგულირება. ამ პირობებში კი სულ უფრო მეტ მნიშვნელობას იძენს ძაბვის რეგულირება ტრანსფორმატორის გამოურთველად.

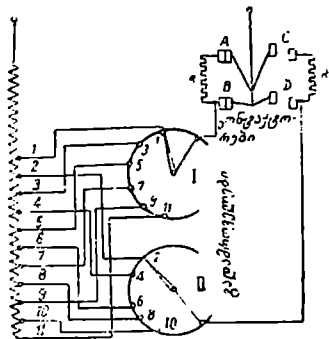
ტრანსფორმატორებმა, რომლებშიც ძაბვის რეგულირება ხორციელდება დატვირთვის ქვეშ, უკანასკნელ წლებში ფართო გავრცელება მიიღო.

ნახ. 196-ზე ნაჩვენებია დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირების სქემა, ცნობილი იანსენის სქემის სახელწოდებით. სქემას აქვს ორი გადამრთველი

და ოთხი კონტაქტორი. კონტაქტების რაოდენობა ორივე გადამრთველზე შეესაბამება რეგულირების საფეხურების რაოდენობას (ნახ. 195-ზე II ასეთი საფეხურია). გადართვის მექანიზმის მუშაობას ყველაზე უფრო ადვილად გამოყარეკვით, თუ თვალს ვადევნებთ აპარატურის მუშაობას გადართვის ერთი მთელი ციკლის განმავლობაში. მექანიზმის მუშაობის თანმიმდევრობა ნახევრებია ნახ. 197-ზე. ნახ. 196-ზე ნახევრებ მდგომარეობაში, ჩართულია გრაფილის 1 განსტოების შესაბამისი ნაწილი. დენი გადის I გადამრთველის



ნახ. 195. ერთეული ტრანსფორმატორი მასზე დაყენებული გადამრთველით (მოსკოვის სატრანსფორმატორო ქარხანა).



ნახ. 196. დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირების სქემა დენზემზღუდავი აქტიური წინააღმდეგობით (იანსენის სქემა).

1 კონტაქტით და B კონტაქტორით. A და B კონტაქტორებს შორის R წინააღმდეგობა დაშენებულია. ამ დროს გადამრთველი II დაყენებულია 2 მდგომარეობაში. 1 და 2 განსტოებებს შორის მოთავსებული ხევეების ჩართვის პროცესი მიმდინარეობს შემდეგი თანმიმდევრობით: ა) გაწყდება კონტაქტორი B, რის შემდეგ დენი გადის R წინააღმდეგობით და A კონტაქტორით; ბ) ჩაიკეტება კონტაქტორი C, რის შემდეგ 1 და 2 კონტაქტებს შორის მოთავსებული ხევეები აღმოჩნდება ჩაკეტილი 2 R წინააღმდეგობაზე, რომელიც ზღუდავს გადართვის პროცესში ხევეებში აღძრულ დენს; ამ დროს დატვირთვის დენი ორი პარალელური შტოთი გადის ორივე გადამრთველში, ემატება რა დენს, რომელიც გაპირობებულია ხევეების ჩაკეტვით, რომელთა მიერთებაც ხდება; გ) გაწყდება კონტაქტორი A; დ) ჩაიკეტება კონტაქტორი D, რის შემდეგ

მდგომარეობა	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

ნახ. 197.

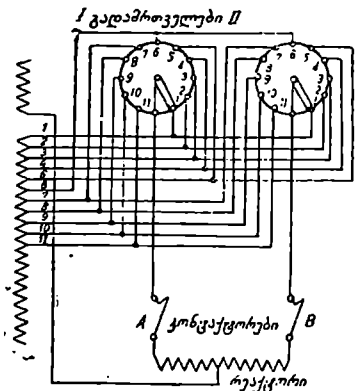
C და D კონტაქტორებს შორის წინააღმდეგობა აღმოჩნდება და მუენტული. შემდეგ გადამრთველი 1 გადაყვანილი იქნება მდგომარეობაში 3, საიდანაც უნდა დაიწყოს გადართვების შენედიგი ციკლი.

გადართვის ყველა ოპერაცია წარმოებს ავტომატურად და ძლიერ სწრაფად, წამის მეთოდ და ზეისედ ნაწილების განმავლობაში.

დ) სქემა დენშემზღუდავი რეაქტორით. ზოგჯერ დენის შესაზღუდავად ხვევებში, რომლებიც მოკლედ ჩაირთვება განშტოებების გადართვის პროცესში, აქტიური წინააღმდეგობის მაკვირად ეხმარება რეაქტიული კოქები. ასეთი გადამრთველი მოწყობილობის სქემა ნაჩვენებია ნახ. 198-ზე. ნახ. 199-ზე მოყვანილი სქემისაგან განსხვავებით აქ ნორმალურ მუშა მდგომარეობაში ჩაქეტილია ორივე კონტაქტორი A და B და მუშა დენი ვადის ორი პარალელური წრედით რეაქტიულ კოქას ორივე ნახევარში. უკანასკნელები ჩართულია ერთმანეთის წინხვედრად, ასე, რომ მათი რეაქტიული მოქმედება ურთიერთს აბათილებს. ერთ-ერთი კონტაქტორის გამართვის დროს კი გადართვის პროცესში გადასართველი ხვევების ჩართვით გაპირობებული დენი, შეიზღუდება კოქას ინდუქტიობით. გადართვის შექანიზმის მოქმედების თანმიმდევრობა ნაჩვენებია ნახ. 199-ზე.

დატვირთვის ქვეშ გადართვის მექანიზმი წარმოადგენს საკმარისად რთულ აპარატს. ხშირად იგი გამოაქვთ ტრანსფორმატორიდან და ათავსებენ ცალკე ზეთის ავზში, რომელიც აიწყობა ტრანსფორმატორის ძირითადი ავზის ხუფზე ან კედელზე.

ნახ. 200, ა-ზე ნაჩვენებია ტრანსფორმატორის ამოსაღები



ნახ. 198. დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირების სქემა დენშემზღუდავი რეაქტიული კოქით.

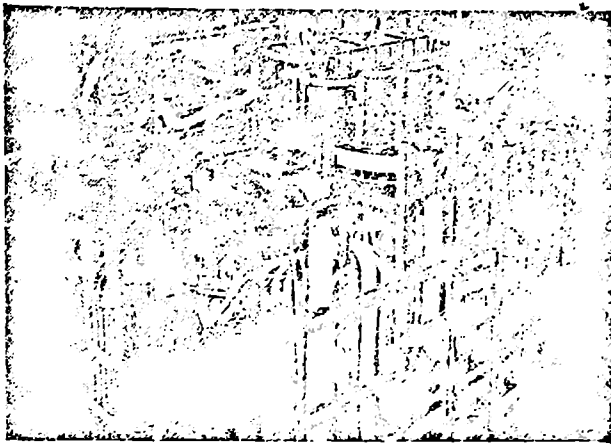
მდგომარეობა	1	2	3	4	5	6
გადამრთველი I	1	2	2	2	2	2
" II	1	1	1	1	2	2
კონტაქტორი A	●	●	●	●	●	●
" B	●	●	●	●	●	●

● კონტაქტორი ჩართულია

ნახ. 199.

ნაწილი გადართვით დატვირთვის ქვეშ, ხოლო ნახ. 200, ბ-ზე გადამრთვი მექანიზმი აწყობილი ზეთის ავზის კედელზე.

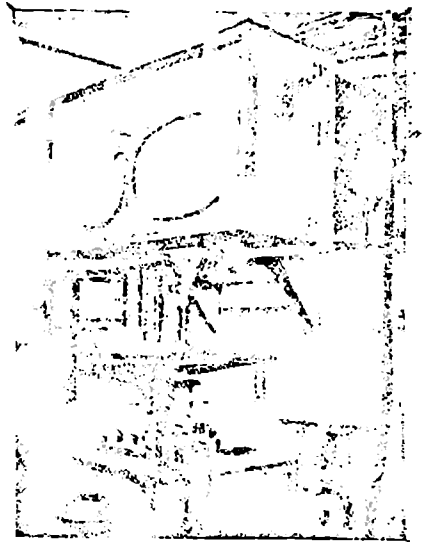
ე) დამატებითი ტრანსფორმატორები. ქსელების ძაბვის რეგულირებისათვის უკანასკნელ ხანებში ფართო გავრცელება ჰპოვეს ეგრეთწოდებულ დამატებით (ანუ სერიულ) ტრანსფორმატორებმა. დამატებითი ტრანსფორმატორის მუშაობის სქემა ნაჩვენებია ნახ. 201-ზე. დამატებითი ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი მიმდევრობით ჩაირთვება სარეგულირებელ ხაზში, პირველადი კი იკვებება შუალედ ტრანსფორმატორიდან. შუალედ ტრანს-



ნახ. 200, ა. MT3-ს დამზადებული მძლავრი ტრანსფორმატორი, დატვირთვის ქვეშ გადამრთველი მექანიზმით. ზემოდან ჩანს დეი შემხლდავი რეაქტიული კოჭა.

ფორმატორის მეორად გრაგნილს აქვს მარეგულირებელი გაშტოვებების საკმარისი რაოდენობა. დამატებითი ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილის ჩართვის ხერხის (პირდაპირი ან შემხვედრი) მიხედვით ტრანსფორმირებული ძაბვა ΔU მიემატება ხაზის ძაბვას ან გამოაკლდება მას.

თუ შუალედი ტრანსფორმატორის მეორად ძაბვას დაეძრავთ ქსელის U ძაბვის მიზართ, მაშინ დამატებითი ტრანსფორმატორის დახმარებით უკანასკნელი შეგვიძლია ვარეგულიროთ არა მარტო ამპლიტუდით, არამედ ფაზითაც, რადგანაც ამ შემთხვევაში ადგილი ექნება ძაბვების გეომეტრიულ შეჯამებას $U \pm \Delta U$. ასეთი რეგულირება გამოყენებას პოულობს რთულ ელექტრულ ქსელეგში მათში აქტიური და რეაქტიული დენების განაწილებისათვის.



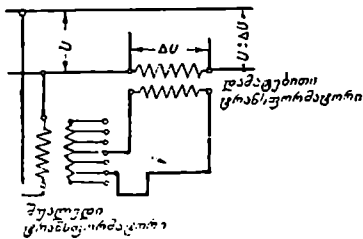
ნახ. 200, ბ. ტრანსფორმატორის გადამრთველი მექანიზმი. ზემოთ—ავზი კონტაქტრებით, რომელიც შეაწყობილია ტრანსფორმატორის ავზის კედელზე; ქვემოთ—ნომეყანი მექანიზმი.

ჩვეულებრივად დამატებითი და შუალედი ტრანსფორმატორები სრულდება, როგორც ერთი აგრეგატი და აიწყობა ერთ ავზში. დამატებითი ტრანსფორმატორის სიმძლავრე შეესაბამება საარეგულირებელ სიმძლავრეს.

ვ) ნორისის რეგულატორი. შედარებით დიდი სიმძლავრეების დროს, დატვირთვის ქვეშ დაბვის მდორე რეგულირებისათვის გამოყენებას პოულობს აგრეთვე საპეციალური ტრანსფორმატორები მოძრავი გრაგნილებით ან გულანას ნაწილებით.

ერთ-ერთ ასეთ ტრანსფორმატორს, ნორისის წინადადების მიხედვით ამზადებს ფერანტის ფირმა.

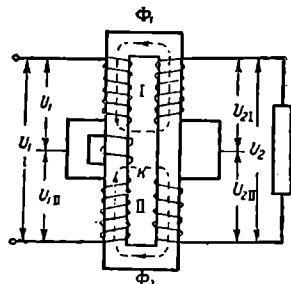
ნორისის რეგულატორი წარმოადგენს საერთო გულანაზე მოთავსებულ ორ ტრანსფორმატორს (ან უფრო ხშირად ავტოტრანსფორმატორს) (ნახ. 202)¹.



ნახ. 20L

ორივე ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილები ჩართულია მიმდევრობით და შემხვედრად ისე, რომ თვითეული ტრანსფორმატორის მთავარი მაგნიტური არეს ინდუქციური ხაზები შეიკვრება ტრანსფორმატორის ფანჯრით. ოთხი ძირითადი გრაგნილის გარდა გულანაზე განლაგდება მოძრავი მოკლედ შერთული გრაგნილი K . როდესაც K გრაგნილი მოთავსებულია შუაში, მასში აღძრული ე. მ. ძ.

ნულის ტოლია. K გრაგნილის გულანას გასწვრივ გადაადგილების დროს, მისი სიმეტრიული განლაგება Φ_1 და Φ_2 მაგნიტურ არეების მიმართ ირღვევა და მასში წარმოიშევა დენი. ამ დროს იცვლება თვითეული ტრანსფორმატორის მთლიანი წინააღმდეგობა და ხდება მათ შორის დაბვის გადანაწილება. როდესაც $\dot{U}_{II} + \dot{U}_{III} = \dot{U}_I = \text{const}$ შეფარდება $\dot{U}_{II} : \dot{U}_{III}$ იქნება ცვლადი, ამის შესაბამისად იცვლება მეორადი დაბვის კოეფიციენტი $\dot{U}_{II} + \dot{U}_{III} = \dot{U}_I$. თვითეული ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის სათანადო შერჩევით საშუალება გვეძლევა განვახორციელოთ მეორადი დაბვის მდორე რეგულირება ფართო ზღვრებში დატვირთვის ქვეშ.



ნახ. 202.

ნორისის რეგულატორის ნაკლს წარმოადგენს მნიშვნელოვანი უქმი სვლის დენი და შედარებით დაბვის დიდი ვარდნა.

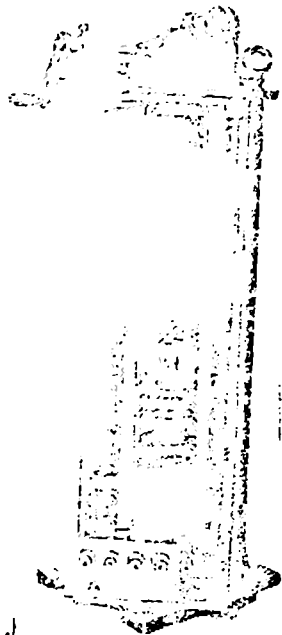
ნორისის რეგულატორები მცირე სიმძლავრეების დროს იხმარება დატვირთვის უშუალო კვებისათვის, დიდი სიმძლავრეების დროს კი ისინი ემ-

¹ ნახაზის მეტი სიზუსტისათვის ნახ. 202-ზე პირველადი და მეორადი გრაგნილები განლაგებულია სხვადასხვა ლეროებზე.

სახურებიან დამატებითი ტრანსფორმატორების პირველადი ძაბვის რეგულირების.

ნახ. 203-ზე ნაჩვენებია ნორისის სკონსტრუქციის ანალოგიური რეგულატორი, დამზადებული მოსკოვის სატრანსფორმატორო ქარხანაში, რომელიც განკუთვნილია მოსკოვის კრემლის ვარსკვლავების ძაბვის რეგულირებისათვის.

ზ) კოხი და შტერცელის ფირმის რეგულატორი. ამ ფირმის რეგულატორი საშუალებას გვაძლევს განვახორციელოთ მდგრად რეგულირება დატვირთვის ქვეშ, ფართო ზღვრებში. მისი მოწყობილობის პრინციპი ნაჩვენებია ნახ. 204-ზე. ამ ნახაზზე 1-1-ორი ერთმანეთის შემხვედრად ჩართული პირველადი გრაგნილია, მოძრავ *K* გულანაზე განლაგებულია მეორადი გრაგნილი. ამ მდგომარეობაში იგი მთლიანად შებმულია ზედა პირველად გრაგნილის მაგნიტური არეს ინდუქციურ ხაზებთან და მასში აღიძვრება ე. მ. ძ. +*E*. საშუალო მდგომარეობაში ე. მ. ძ. ნულის ტოლია. უკიდურესად ქვედა მდგომარეობაში დ მეორადი გრაგნილი შებმულია ქვედა პირველადი გრაგნილის არეს ინდუქციურ ხაზებთან და მასში აღიძვრება ე. მ. ძ. -*E*. ამგვარად, *K* გულანას გადაადგილებისას ხდება მეორადი ძაბვის რეგულირება ზღვრებში +*E*-დან -*E*-მდე.



ნახ. 203.

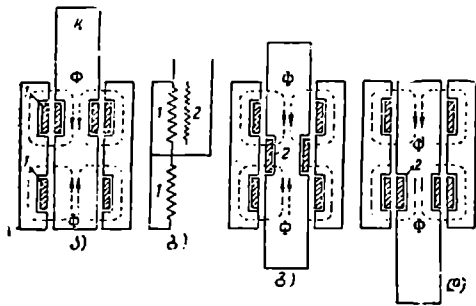
კოხი და შტერცელის ფირმის რეგულატორები იხმარება როგორც დატვირთვის უშუალო კვებისათვის, ასევე დამატებითი ტრანსფორმატორის პირველადი ძაბვის რეგულირებისათვის.

17. მოკლედ შერთვის პროცესი

ა) პროცესის საერთო დახასიათება. ტრანსფორმატორის მოკლედ შერთვა ავარიული პროცესია, რომლის დროსაც, პირველად გრაგნილზე მოდებული სრული ძაბვის შემთხვევაში, მეორადი გრაგნილი ჩაირთვება მოკლედ (ნახ. 205). ექსპლუატაციაში ასეთ შემთხვევებს ადგილი აქვს სისტემის სხვადასხვაგვარ უწყისეობის შედეგად. ეს შემთხვევები შეიქმნება წარმოადგენდეს აგრეთვე ნორმალური მუშაობის შედეგს იმ დარღვევებისას, რომლებიც წინ უსწრებდა მათ, მაგ. გადაძაბვებისას.

მოკლედ შერთვა ტრანსფორმატორისათვის წარმოადგენს სერიოზულ საფრთხეს. მოკლედ შერთვის დროს შეიქმნება ძლიერ დიდი დენები, რომლებიც მკვეთრად ზრდიან გრაგნილის ტემპერატურას, რაც ემუქრება იზო-

ლაციის მთლიანობას. კიდევ უფრო მეტად იზრდება ელექტრომაგნიტური ძალები ტრანსფორმატორის გრაგნილებში, რასაც ასევე შეუძლია მიგვიყვანოს ავარიამდე. ნახ. 206-ზე ნაჩვენებია ტრანსფორმატორი, რომლის გრაგნილი დანგრეულია მოკლედ შერთვის დროს.

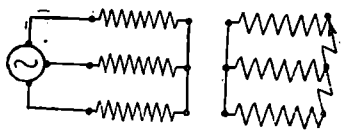


ნახ. 204.

სამუხა ტრანსფორმატორის სიმეტრიული მოკლედ შერთვის დროს, პროცესი ყოველ ფაზაში მიმდინარეობს ერთფაზა ტრანსფორმატორში პროცესის ანალოგიურად. ამიტომ ჩვენ დავეყვარებით ერთფაზა ტრანსფორმატორში პროცესის გამოკვლევით.

სიმეტრიული მდგენელების თეორიიდან ცნობილია, რომ მოკლედ შერთვის დამყარებული დენების მნიშვნელობა სამ, ორ და ერთპოლუსა მოკლედ შერთვისას შეიძლება განსაზღვრულ იქნეს შემდეგი გამოსახულებებიდან:

$$\begin{aligned} I_{k3} &= \frac{\dot{U}_{\text{ფ}}}{Z_k}; \\ I_{k2} &= \frac{\sqrt{3} \dot{U}_{\text{ფ}}}{2Z_k}; \\ I_{k1} &= \frac{3\dot{U}_{\text{ფ}}}{2Z_k + Z_H}. \end{aligned}$$



ნახ. 205. სამუხა ტრანსფორმატორის მოკლედ შერთვის სქემა.

სადაც Z_H — ტრანსფორმატორის ნულოვანი მიმდევრობის წინააღმდეგობაა. ეინაიდან $Z_H \geq Z_k$, ამიტომ მოკლედ შერთვის დამყარებული დენი ყველაზე უფრო მეტ მნიშვნელობას მიიღებს სამპოლუსა მოკლედ შერთვის დროს. ამიტომ ტრანსფორმატორის მოკლედ ჩართვის პროცესთან დაკავშირებულ ყველა გათვლებს, ჩვეულებრივად აწარმოებენ სამპოლუსა ჩართვისათვის, როგორც ყველაზე უფრო საშიშისათვის.

ბ) მოკლედ შერთვის დენის ანგარიში. მოკლედ შერთვის რეჟიმის გამოსაკვლევად მთლიანად გამოსადეგია ტრანსფორმატორის ძირითადი დიფერენციალური განტოლებები, რომლებიც ამ შემთხვევაში ჩაწერილი უნდა იქნეს შემდეგნაირად (ნახ. 207):

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + i_1 r_1 = u_1; \quad (17,1)$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 r_2 = 0. \quad (17,2)$$

რომ თუ უგულებელყოთ დამამაგნიტებელი დენის გავლენას და დიუშვებთ,

$$i_1 = -i_2, \quad (17,3)$$

მაშინ (17,1) და (17,2)-ის შეჯამებით და (17,3)-ის დახმარებით i_2 -ის გამო-
რაციებით მივიღებთ:

$$u_1 - (L_1 + L_2 - 2M_{12}) \frac{di_1}{dt} - i_1(r_1 + r_2) = 0. \quad (17,4)$$

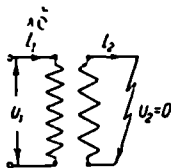
ვინაიდან

$$L_1 + L_2 - 2M_{12} = L_k; \quad r_1 + r_2 = r_k,$$

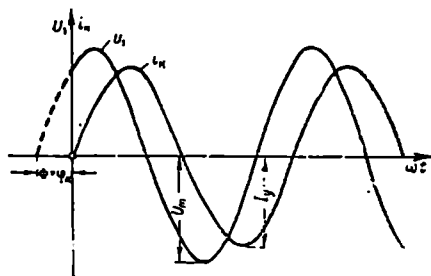
(L_k და r_k —ინდუქტიობა და აქტიური წინააღმდეგობაა მოკლედ შერთვის
დროს), ამიტომ განტოლება (17,4) შეიძლება გადაიწეროს შემდეგი სახით:

$$u_1 - L_k \frac{di_1}{dt} - i_1 r_k = 0. \quad (17,5)$$

გარდამავალი პროცესების თეორიის თანახმად მოკლედ შერთვის დენი
ყოველ ადებულ მომენტში შეიძლება განიილულ იქნეს, როგორც ორი დე-



ნახ. 207. სქემა მოკლედ შერთვის
რეჟიმის გამოკვლევასათვის.



ნახ. 208.

ნახ. 206. მოკლედ შერთვის დროს
მექანიკური ძალებით. დაზრდილი
ტრანსფორმატორის გრაფილი.

ნის—მოკლედ შერთვის დამყარებული დენის და თავისუფალი დენის ჯამი:

$$i_1 = i_k = i_p + i_{cs}. \quad (17,6)$$

მოკლედ შერთვის დამყარებული დენი ტოლია $I_y = \frac{U_1}{Z_k}$.

თუ მივიღებთ, რომ პირველადი ძაბვა სინუსოიდურია $U_1 = U_m \sin(\omega t + \psi)$, (ψ —მოკლედ შერთვის მომენტში, ($t=0$) ძაბვის მყისა მნიშვნელობის დამახასიათებელი კუთხეა), მაშინ

$$i_y = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) = I_y \sin(\omega t + \psi - \varphi_k), \quad (17,7)$$

სადაც φ_k —ფაზური კუთხეა მოკლედ შერთვის დროს.

i_{cs} თავისუფალი დენის მნიშვნელობა განისაზღვრება განტოლებიდან

$$L_k \frac{di_{cs}}{dt} + i_{cs} r_k = 0, \quad (17,8)$$

საიდანაც ვპოულობთ:

$$i_{cs} = i_{ocs} e^{-\frac{r_k}{L_k} t}, \quad (17,9)$$

სადაც i_{ocs} —თავისუფალი დენის მნიშვნელობაა, როდესაც $t=0$. მოკლედ შერთვის დენი პირველ მომენტში, როდესაც $t=0$, უდრის i დატვირთვის დენს მოკლედ შერთვის მომენტში $i_{ocs} + i_{oy} = i$.

ამიტომ

$$i_{ocs} = i - i_{oy} = I \sin(\psi - \varphi) - I_y \sin(\psi - \varphi_k), \quad (17,10)$$

სადაც φ —ფაზური კუთხეა მოკლედ შერთვის მომენტში. თუ (17,10)-ს ჩავსვამთ (17,9)-ში, მივიღებთ:

$$i_{cs} = [I \sin(\psi - \varphi) - I_y \sin(\psi - \varphi_k)] e^{-\frac{r_k}{L_k} t}. \quad (17,11)$$

(17,6), (17,7) და (17,11)-ის თანახმად მოკლედ შერთვის სრული დენი

$$i_k = I_y \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) + [I \sin(\psi - \varphi) - I_y \sin(\psi - \varphi_k)] e^{-\frac{r_k}{L_k} t}. \quad (17,12)$$

(17,12) ტოლობა გვიჩვენებს, რომ მოკლედ შერთვის დენის სიდიდე დამოკიდებულია ძაბვის ფაზისაგან (ψ კუთხისაგან) მოკლედ შერთვის მომენტში.

ვინაიდან ჩვეულებრივად მოკლედ შერთვის დენის სიდიდე მრავალჯერ აკრებებს დატვირთვის დენს, ამიტომ (17,12) გამოსახულების ანალიზის გასაადვილებლად I დენი უგულებელვყოთ, ე. ი. ჩავთვალოთ, რომ მოკლედ შერთვა მოხდა უქმი სელის დროს და $I=0$. ამ შემთხვევაში ტოლობა (17,12) იღებს სახეს:

$$i_k = I_y [\sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - \sin(\psi - \varphi_k)] e^{-\frac{r_k}{L_k} t}. \quad (17,13)$$

(17,13) ტოლობა გვიჩვენებს, რომ როდესაც $\psi = \varphi_k$, თავისუფალი დენი სრულიად არ წარმოიშევა, ვინაიდან ამ შემთხვევაში $\sin(\psi - \varphi_k) = 0$ და მოკ-

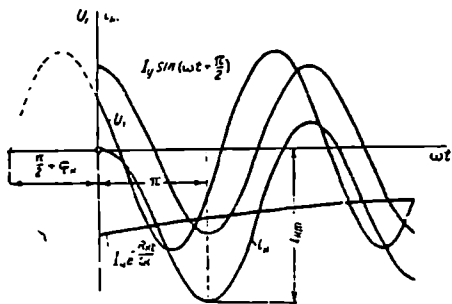
ლელ შერთვის დენი ერთბაშად აღწევს დამყარებულ მნიშვნელობას (ნახ. 208). პირიქით, როდესაც $\psi = \frac{\pi}{2} + \varphi_k$ თავისუფალი დენი აღწევს უდიდეს მნიშვნელობას (ნახ. 209), ხოლო მოკლედ შერთვის სრული დენი აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას მოკლედ შერთვის მომენტიდან დაახლოებით ნახევარპერიოდის შემდეგ, ე. ი. როდესაც $\omega t = \pi$: მოკლედ შერთვის სრული დენის მაქსიმალურ მნიშვნელობას მივიღებთ, თუ (17,13) ტოლობაში ჩავსვათ

$$\psi = \frac{\pi}{2} + \varphi_k \text{ და } i = \frac{\pi}{\omega}.$$

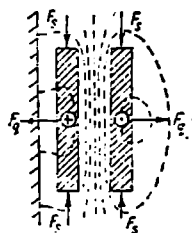
$$i_{\text{მ}} = I_y (-1 - e^{-\frac{r_k}{\omega L_k} \pi}) = -I_y (1 + e^{-\frac{r_k}{\omega L_k} \pi}). \quad (17,14)$$

(17, 14) გამოსახულების ფრჩხილებში მდგომი წევრი გვიჩვენებს თუ, რამდენჯერ მეტია მოკლედ შერთვის სრული დენის მაქსიმალური მნიშვნელობა მისი დამყარებული მნიშვნელობის ანპლიტუდაზე. $\frac{r_k}{\omega L_k}$ შეფარდების მიხედვით ეს წევრი შეიძლება იცვლებოდეს 1-დან 2-მდე. ტრანსფორმატორის სიმძლავრის ზრდასთან ერთად შეფარდება $\frac{r_k}{\omega L_k}$ ჩვეულებრივ მცირდება. ამიტომ დიდი ტრანსფორმატორებისათვის შეფარდება $\frac{i_{\text{მ}}}{I_y}$ მეტია, ვიდრე მცირე ტრანსფორმატორებისათვის.

რაც შეეხება მოკლედ შერთვის დამყარებულ დენს, მისი ჯერადობა ნო-



ნახ. 209.



ნახ. 210.

მინალური დენის ეფექტური მნიშვნელობის მიმართ აღვიღად შეიძლება დადგენილ იქნეს, გამოვსახავთ რა ნომინალურ ძაბვას მოკლედ შერთვის ძაბვის საშუალებით

$$I_y = \frac{U}{z_k} \sqrt{2} = \frac{I_H}{\epsilon_k} \sqrt{2} \cdot 100; \quad \frac{I_y}{I_H} = \frac{\sqrt{2} \cdot 100}{\epsilon_k}.$$

ამრიგად, ნოკლედ შერთვის დენის მაქსიმალური მყისა მნიშვნელობა შეიძლება შემდეგნაირად იქნეს გამოსახული:

$$i_{km} = I_m \frac{100}{e_k} (1 + e^{-\frac{\gamma_k}{x_k} \pi}) \sqrt{2}. \quad (17,15)$$

თანამედროვე ტრანსფორმატორების e_k იმყოფება ზღვრებში 5%-დან (მცირე ტრანსფორმატორებისათვის) 15%-მდე (მსხვილი ტრანსფორმატორებისათვის). თუ ავიღებთ საშუალო სიდიდეებს $e_k = 7\%$ და $\frac{i_{km}}{I_n} = 1,5$, მა-

$$\begin{aligned} \text{შინ ნოკლედ შერთვის მაქსიმალური დენის ჯერადობა იქნება } \frac{i_{km}}{I_n} = \\ = -\frac{100}{7} \cdot 1,5 \cdot \sqrt{2} = 30. \end{aligned}$$

ტრანსფორმატორი მექანიკურად ისე უნდა იყოს გამოთვლილი, რომ გაუძლოს ასეთი დენების დროს აღძრულ ელექტრომაგნიტურ ძალებს.

გ) ელექტრომაგნიტური ძალები მოკლედ შერთვის დროს. ტრანსფორმატორის გრაგნილებს შორის მოქმედი ელექტრომაგნიტური ძალები, ნომინალურ დატვირთვის დროს იმდენად უმნიშვნელოა, რომ გრაგნილების მექანიკური სიმტკიცის შეფასების დროს ისინი მხედველობაში არ მიიღება. მოკლედ შერთვის დროს ეს ძალები, რომლებიც დენის კვადრატის პროპორციულია, რამდენიმე ასეულჯერ იზრდება და ადვილად შესძლებენ გრაგნილების დეფორმაციას, მიჰყავს რა ისინი ზოგიერთ შემთხვევაში დანგრევამდე.

ტრანსფორმატორებში ადგილი აქვს, როგორც ურთიერთ მიზიდულობის, ასევე ურთიერთ განზიდულობის ელექტრომაგნიტურ ძალებს. ნახ. 210-ზე სქემატურად ნაჩვენებია მექანიკური ძალების მოქმედება კონცენტრულ სიმეტრიულ გრაგნილებთან ტრანსფორმატორში. ერთი გრაგნილის პარალელურად მოთავსებული გამტარები შინაგანი ურთიერთ მიზიდულობის E_s ძალების გავლენით კუმშავენ გრაგნილს. გარდა ამისა, ორივე გრაგნილს შორის, რომლებშიც გადის საწინააღმდეგო ნიშნის დენები, იმოქმედებს ურთიერთ განზიდვის გარეგანი ძალები F_g . ეს ძალები მიისწრაფვის, თანაბრად გასკივოს გარე გრაგნილი და შეკუმშოს შიგა გრაგნილი (ნახ. 211).

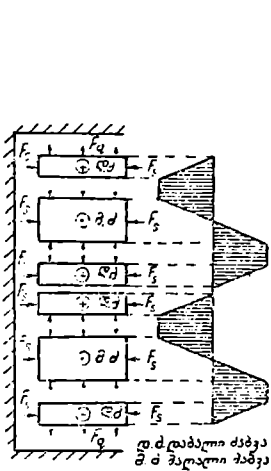
დისკოსებური მონაცვლე სიმეტრიული გრაგნილის შემთხვევაში (ნახ. 212), გარე ძალები F_g მიმართულია ღეროს გასწვრივ. ეს ძალები კოქას კუმშავს ღერძის მიმართულებით. გრაგნილის განაპირა ნახევარკოქები განიცდის ერთმხრივ ღერძულ დაწოლას, რომელიც მიმართულია უღლისაკენ და ამიტომ მოითხოვს სპეციალურ გამაგრებას, ნახ. 213-ზე ნაჩვენებ დეფორმაციების თავიდან ასაცილებლად.

F_g ძალების მიმართულება, ადვილად შეიძლება იქნეს გამოკვეთილი კოქებში გამავალი დენების, ფანტეის მაგნიტურ არესთან ურთიერთ მოქმედებიდან გამომდინარე (ნახ. 212). შინაგან F_s ძალებს დისკოსებურ გრაგნილებში აქვს რადიალური მიმართულება.

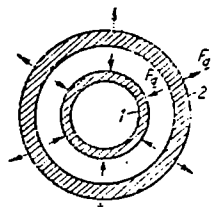
დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს ცილინდრული გრაგნილების წე-

სიერ კონსტრუირებას, როდესაც გვაქვს ხვევები, რომლებიც გამოირთვება გრაგნილში ქაბვის რეგულირებისათვის. ასეთი გრაგნილების არაწესიერი კონსტრუქციის შემთხვევაში, მათში შეიძლება აღიძვრეს მნიშვნელოვანი ღერძული ძალები.

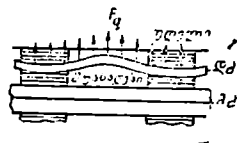
განვიხილოთ გრაგნილი (ნახ. 214), რომელსაც ერთ კიდებზე გამოართული აქვს ხვევები. A გრაგნილზე იმოქმედებს ღერძული ძალა F_A , რომელიც შიგა გრაგნილის ნაწილ 2-სა და A გარე გრაგნილის შორის განზიდვის ძალის ღერძულ მდგენელს ტოლია. შიგა გრაგნილის ნაწილი 1, ურთიერთქმედებს A გრაგნილთან, ღერძულ მდგენელს არ მოგვცემს. ამრიგად $F_A = F_{A2}$.



ნახ. 212.



ნახ. 211



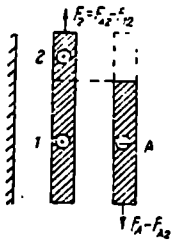
ნახ. 213. დისკოსებური გრაგნილის განაპირა ნახევარკოვას დეფორმაცია გარეგანი F_q ძალის მოქმედებით.

ანალოგიურად შეიძლება იქნეს მოძებნილი ღერძული ძალა $F_2 = F_{A2} - F_{12}$, რომელიც მოქმედებს შიგა გრაგნილის 2 ნაწილზე. როგორც ნახ. 214-დან ჩანს, ღერძული ძალები ისეა მიმართული, რომ ისინი მიისწრაფვიან გაზარდონ გრაგნილების ასიმეტრია, რომელიც შექმნილია ხვევების გამოართვით.

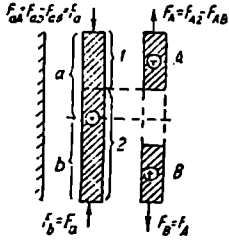
ნახ. 215-ზე ნაჩვენებია გრაგნილის შუა ნაწილში ხვევების გამოართვის შემთხვევა. ღერძული ძალა F_A შედგება განზიდვის F_{A2} ძალისაგან და F_{AB} მიზიდვის ძალისაგან. ჩვეულებრივად $F_{A2} > F_{AB}$ და F_A ძალა მიმართულია ულლისაკენ. მაგრამ ზოგიერთ შემთხვევებში შესაძლებელია გრაგნილი ისე იქნეს კონსტრუირებული, რომ $F_{A2} \approx F_{AB}$, მაშინ $F_A \approx 0$. შიგა გრაგნილის ზემო ნახევარზე მოქმედი ღერძული ძალა F_{A2} ტოლია განზიდვის ქვევით მიმართული F_{AB} ძალის, მიზიდვის, ასევე ქვევით მიმართული, F_{A2} ძალის, და ზევით მიმართული, განზიდვის F_{AB} ძალის. ვინაიდან $F_{A2} + F_{A2} > F_{AB}$, რეზულტიური ღერძული ძალა F_A კუმშავს გრაგნილს. ქაბვის რეგულირების

ასეთი ხერხის დროს ჩვეულებრივად გარე გრავნილი განიციდის ორმხრივ გაქიმვას, ხოლო შიგა—ორმხრივ კუმშვას. ღერძული ძალების თვალსაზრისით უფრო რაციონალურია ხვევების გამორთვა გრავნილის შუა ნაწილიდან.

ნახ. 214 და 215-ზე მოყვანილი ღერძული ძალების ანალიზი ატარებს ხარისხობრივ ხასიათს. იგი გვაძლევს საშუალებას განვსაზღვროთ რეზულტიური ძალა, რომელიც მოქმედებს გრავნილის რომელიმე ნაწილზე იმ დაშვებით, რომ უკანასკნელი წარმოადგენს მექანიკურად შეკავშირებულ სხეულს. სინამდვილეში გრავნილი შედგება დაწნეხილ, მაგრამ მექანიკურად ურთიერთ შორის სუსტად დაკავშირებულ ნაწილებისაგან (კოქებისაგან). ამიტომ ხშირად რეზულტიური ძალის განსაზღვრა არ არის საკმარისი გრავნილის სიმეტრიის შესაფასებლად.



ნახ. 214.



ნახ. 215.

ამ შემთხვევებში გვიხდება გრავნილის ფარგლებში ფანტვის არეს განაწილების გამოკვლევა და მის ცალკეულ ელემენტებზე მოქმედი ძალების განსაზღვრა (2,27) ტოლობის საშუალებით.

ეხლა გადავიდეთ უმარტივეს შემთხვევებში გრავნილზე მოქმედ რეზულტიურ ელექტრომაგნიტური ძალების რაოდენობრივი შეფასების საშუალებების განხილვაზე.

I ნაწილის § 2-ის თანახმად, x მიმართულებით მოქმედი ელექტრომაგნიტური ძალა, შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს როგორც $F_x = \frac{dW}{dx}$. მოკლედ შერთვის დროს ენერჯია W დაგროვილია ფანტვის არეში, ამასთან.

$$W = \frac{L_k i_k^2}{2} \quad (17,16)$$

განვსაზღვროთ სიმეტრიულ ცილინდრულ გრავნილში მოქმედი რადიალური ძალები. x კოორდინატად შეიძლება მიღებულ იქნეს გრავნილებს შორის არხის სიგანე a_{12} .

ამიტომ

$$F_r = F_x = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{dL_k}{da_{12}} \quad (17,17)$$

თუ (17,17) ფორმულაში F_x ძალას გამოვსახავთ kG -ში, დენს A -ში და ინდუქტიუობას H -ში, მაშინ

$$F_r = 5,1 i_k^2 \frac{dL_k}{da_{12}} \text{ kG} \quad (17,18)$$

II ნაწილის § 11, ბ-ს თანახმად ცილინდრული გრაგნილის ინდუქტივობა L_k შეიძლება გამოსახულ იქნეს შემდეგნაირად:

$$L_k = \frac{1,256 \cdot 10^{-9} \pi D \cdot k_R \cdot 10^{-8}}{l} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right). \quad (17,19)$$

მახლოებით დაუშვებთ რა, რომ კოეფიციენტი k_R მუდმივი სიდიდითაა, მივიღებთ:

$$\frac{dL_k}{da_{12}} = \frac{1,256 \cdot 10^{-9} \pi D \cdot k_R \cdot 10^{-8}}{l}$$

და

$$F_7 = \frac{6,4 \cdot 10^{-9} \pi D \cdot k_R \cdot 10^{-8}}{l} \text{ kG}. \quad (17,20)$$

ვინაიდან პრაქტიკულ ინტერესს წარმოადგენს F_7 ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობა, ამიტომ (17,20) გამოსახვაში უნდა იქნეს ჩასმული i_{km} მოკლედ შერთვის დენის მაქსიმალური მნიშვნელობა (17,14)-ის თანახმად.

ამგვარად, მიღებული F_7 ძალა მოდებულია გრაგნილის მთელ ცილინდრულ ზედაპირზე. ამ ძალის უფრო მოხერხებულად შეფასებისათვის იგი შეიძლება შეეუფარდოს ზედაპირის 1 cm^2 -ს. მაშინ

$$f_7 = \frac{F_7}{\pi D l} = \frac{6,4 \cdot 10^{-9} \pi D \cdot k_R \cdot 10^{-8}}{l^2} \text{ kG/cm}^2. \quad (17,21)$$

გრაგნილში, ღერძული მიმართულებით მოქმედი შიგა ძალების განსაზღვრის დროს, x კოორდინატად მიღებულ უნდა იქნეს გრაგნილის სიგრძე l :

და

$$\frac{dL_k}{dl} = \frac{-1,256 \cdot 10^{-9} \pi D k_R \cdot 10^{-8}}{l^2} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)$$

$$F_8 = - \frac{6,4 \cdot 10^{-9} \pi D \cdot k_R \cdot 10^{-8}}{l^2} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \text{ kG}. \quad (17,22)$$

ვინაიდან F_8 ძალა შეესაბამება ორივე გრაგნილს, ამიტომ ერთ გრაგნილში მოქმედებს ორჯერ ნაკლები ძალა

$$F_8' = \frac{F_8}{2} = - \frac{3,2 \cdot 10^{-9} \pi D \cdot k_R \cdot 10^{-8}}{l^2} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \text{ kG}. \quad (17,23)$$

(17,22) და (17,23)-ში ნიშანი მინუსი იმის მაჩვენებელია, რომ ძალები F_7 და F_8' ეწინააღმდეგება x კოორდინატის დადებით ცვლილებას, ე. ი. გრაგნილის გაგრძელებას.

მაგალითი. მაგალითისათვის განვიხილოთ 5600 kVA სიმძლავრის სამფაზა ტრანსფორმატორი, რომლის მონაცემებია:

$$I_H = 324 \text{ A}; \quad \nu = 144; \quad D = 55 \text{ cm}; \quad l = 90 \text{ cm}; \quad \epsilon_k = 5,5\%;$$

$$\frac{i_{km}}{I_y} = 1,5; \quad k_R = 0,96; \quad a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 5,5 \text{ cm}.$$

მოკლედ შერთვის მაქსიმალური დენი ტოლია:

$$i_{km} = I_y \cdot 1,5 \cdot \sqrt{2} = I_H \frac{100}{e_k} \cdot 1,5 \cdot \sqrt{2} = 324 \cdot 18,2 \cdot 1,5 \cdot \sqrt{2} = 12500 \text{ A.}$$

(17,20) ფორმულით ეპოულობთ:

$$F_q = \frac{6,4 \cdot 12500^2 \cdot 144^2 \pi \cdot 55 \cdot 0,96 \cdot 10^{-8}}{90} = 3,8 \cdot 10^5 = 380 \text{ t.}$$

(17,21)-ის შესაბამისად

$$f_q = \frac{380 \cdot 10^3}{\pi \cdot 55 \cdot 90} = 24,3 \text{ kG/cm}^2.$$

ძალას, რომელიც ღერძული მიმართულებით კუმშავს გრაგნილს, ეპოვი-
თ (17,23)-ს მიხედვით

$$F_s' = - \frac{3,2 \cdot 12500^2 \cdot 144^2 \pi \cdot 55 \cdot 5,5 \cdot 0,96 \cdot 10^{-8}}{90^2} = 1,16 \cdot 10^4 = -11,6 \text{ t,}$$

ელექტრომაგნიტური ძალები დისკოსებურ მონაცვლე გრაგნილებში გა-
ნისაზღვრება ისევე, როგორც ცილინდრულ გრაგნილებში. II ნაწილის
§ 11, ბ-დან გამომდინარეობს, რომ დისკოსებური გრაგნილის ერთი ჯგუფის
ინდუქტივობა L_k ტოლია:

$$L_k = \frac{1,256 \cdot w^2 \cdot \pi D \cdot k_R \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)}{n^2 l} \cdot 10^{-8}, \quad (17,24)$$

სადაც n —კოქების ჯგუფების რიცხვია.

ამიტომ ერთი ჯგუფის ფარგლებში მოქმედი F_q ღერძული ძალების
განსაზღვრისას ვღებულობთ:

$$\frac{dL_k}{da_{12}} = \frac{1,256 w^2 \pi D \cdot k_R \cdot 10^{-8}}{n^2 l}$$

და

$$F_q = \frac{6,4 i_k^2 w^2 \pi D \cdot k_R \cdot 10^{-8}}{n^2 l} \text{ kG.} \quad (17,25)$$

ანალოგიურად განისაზღვრება შინაგანი (რადიალური) ძალები:

$$\frac{dL_k}{dl} = \frac{1,256 i_k^2 w^2 \pi D \cdot k_R \cdot 10^{-8}}{n^2 l^2} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)$$

და

$$F_s = - \frac{6,4 i_k^2 w^2 \pi D \cdot k_R \cdot 10^{-8}}{n^2 l^2} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \text{ kG.} \quad (17,26)$$

ეს შინაგანი ძალა მოქმედობს ჯგუფის ორივე კოქაზე. ძალა, რომელიც შოდის ერთ კოქაზე, იქნება ორჯერ ნაკლები

$$F_s' = \frac{F_s}{2} = \frac{3,2i_k^2 \omega^2 \pi D \cdot k_{\text{D}} \cdot 10^{-8}}{n^2 l^2} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) kG. \quad (17,27)$$

ერთის მხრივ (17,20), (17,23) და მეორე მხრივ (17,25), (17,27) ფორმულების შედარება გვაჩვენებს, რომ დისკოსებურ გრაგნილში, როგორც გარეგანი, ასევე შინაგანი მექანიკური ძალები შიილება გაცილებით ნაკლები სიდიდისა, ვიდრე ცილინდრულ გრაგნილში.

ღ) გრაგნილების გახურება მოკლედ შერთვის დროს. ეს საკითხი, რომელსაც დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს განხილულ იქნება ქვემოთ § 18, ზ-ში.

18. ტრანსფორმატორის გახურება და გაცივება

ბ) გახურების და გაცივების საკითხის მნიშვნელობა. ტრანსფორმატორში დაკარგული ელექტრული ენერგია გარდაიქმნება სითბოდ, რომელიც გამოიყოფა გრაგნილებში, გულანაში და ტრანსფორმატორის სხვა ნაწილებში. ამ დროს ტრანსფორმატორი ხურდება ისეთ ტემპერატურამდე, რომელიც მნიშვნელოვნად აღემატება გარემოს ტემპერატურას.

ტრანსფორმატორში დანაკარგების ზოდასთან ერთად იზრდება მისი ტემპერატურა. დანაკარგები კი თავის მხრივ დამოკიდებულია ელექტრულ და მაგნიტურ დატვირთვებზე: დანაკარგები გულანაში დაახლოებით ინდუქციის კვადრატის პროპორციულია, ხოლო დანაკარგები გრაგნილებში--დენის სიმკვრივის კვადრატის. ამგვარად, რაც უფრო მაღალია ტრანსფორმატორში დასაშვები ტემპერატურა, მით უფრო მეტია მისთვის დასაშვები დატვირთვები და, მაშასადამე, მით უფრო მეტი სიმძლავრე შეიძლება იქნეს მიღებული მისგან. თუმცა ინდუქციის და დენის სიმკვრივის ზოდასთან ერთად მცირდება ტრანსფორმატორის მ. კ. კ., მაგრამ ეს არ არის მთავარი მიზეზი, რომელიც ზღუდავს ტრანსფორმატორის სიმძლავრეს.

ტრანსფორმატორში გამოყენებული სხვადასხვა საიზოლაციო მასალები მეტად მგრძობიარეა ტემპერატურის ნომატებისადმი. ქალაღდის იზოლაცია, რომელიც თანამედროვე ტრანსფორმატორმშენებლობაში თამაშობს ძირითად როლს, ერთ-ერთი ყველაზე ნაკლებად თბომღგრადი მასალაა. უმაღლესი ტემპერატურა, რომელსაც ხანგრძლივი დროის განმავლობაში შეუძლია გაუძლოს ქალაღდის იზოლაციამ, თავის საიზოლაციო თვისებების არსებითად დაუქვეითებლად, მოთავსებულია ზღვრებში 95-დან 105°C-მდე. რაც უფრო მაღალია შერჩეულ დასაშვები ტემპერატურა, მით უფრო ნაკლებია იზოლაციის სამსახურის ვადა. ექსპერიმენტალურად დადგენილია, რომ ტემპერატურის გაზრდა 8°C-ით ორჯერ ამოკლებს ტრანსფორმატორის იზოლაციის სამსახურის ვადას. ამიტომ თუ ტრანსფორმატორის სამსახურის ვადას 95°C ხანგრძლივი ტემპერატურის დროს მივიღებთ 100%-ად, მაშინ 95+8=103°C ტემპერატურის დროს მისი სამსახურის ხანგრძლიობა შემცირდება 50%-მდე, ხოლო 105°C დროს კი 42%-მდე.

ОСТ 2524 ტრანსფორმატორების ცალკეული ნაწილებისათვის ითვალისწინებს შევლევ უღიდეს საანგარიშო ტემპერატურებს:

გრაგნილისათვის 105°C
გულანასათვის (ზედაპირზე)	. 110°C
ზეთისათვის (ზენო ფენებში) .	95°C

ამ დროს გარემო ჰაერის ტემპერატურა აიღება 35°C:

უნდა აღინიშნოს, რომ ტრანსფორმატორში საანგარიშო ტემპერატურები არ უნდა იქნეს განუწყვეტლივ, ხელოვნურად შენარჩუნებული დატვირთვის ფორსირებით, რადგან ამ პირობებში ტრანსფორმატორის სამსახურის ვადა მნიშვნელოვნად შემცირდებოდა ნორმალურ ვადასთან შედარებით, რომელიც 15—20 წლის ტოლია. საანგარიშო ტემპერატურა დადგენილია გარემოს დღელაშური და წლიური ტემპერატურის აუცილებელი რყევის და ტრანსფორმატორის დატვირთვის გარდუვალი რყევის გათვალისწინებით, ე. ი. იმის გათვალისწინებით, რომ ექსპლოატაციის პირობებში უღიდესი საანგარიშო ტემპერატურების პერიოდები ყოველთვის შეენაცვლება უფრო დაბალი ტემპერატურების პერიოდებს. ამ პირობებში, როგორც ექსპლოატაციის მრავალწლიანმა გამოცდილებამ, დაგვანახა ზემომოყვანილი საანგარიშო ტემპერატურები სავსებით დასაშვებია და უზრუნველყოფენ ტრანსფორმატორის მუშაობას მისი ამორტიზაციის ნორმალური ვადის განმავლობაში.

ახალი თბომდგრადი და უწყადი მასალების გამოძებნა დასაშვები ზღვრული ტემპერატურების გადაუქარბებლად, დასაშვებ დატვირთვების გაზრდასთან ერთად, წარმოადგენს თანამედროვე ელექტრომანქანათმშენებლობის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს ამოცანას.

ბ) თბური პროცესებში ტრანსფორმატორში. თბური პროცესების მხრივ ტრანსფორმატორი წარმოადგენს უკიდურესად არაერთგვაროვან სხეულს. მაღალი თბოგამტარობის და შედარებით მცირე თბოტევადობის მქონე გულანას ფოლადის ფურცლები, ენაცვლება საიზოლაციო (ქალაღის ან ლაქის) ნათენობებს, რომელთა თბოგამტარობა არ არის დიდი. ტრანსფორმატორის გრაგნილი ასევე წარმოადგენს მაღალი თბოგამტარიანობის მქონე სპილენძის რთულ შეერთებას საიზოლაციო მასალასთან, რომელიც წარმოადგენს არა მარტო ელექტრულ, არამედ თბურ იზოლაციასაც.

გულანას ფოლადის ფურცლები და გრაგნილის სპილენძი წარმოადგენს თბური ენერჯის წყაროებს. შეიძლება ჩაითვალოს, რომ ერთეულ მოცულობაში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა, ერთნაირია გულანას და გრაგნილის მთელ კვეთში, მაგრამ ასეთ შემთხვევაში გაცივების პირობების გაუარესების გამო, ზედაპირიდან დაშორებასთან ერთად კვეთის სხვადასხვა წერტილებს ექნება სხვადასხვა ტემპერატურა. შიგა და გარე ნაწილების ტემპერატურათა სხვაობის ზეგავლენით როგორც გრაგნილში, ასევე გულანაში დამყარდება სითბოს მოძრაობა უფრო გახურებულ შიგა ნაწილებიდან ზედაპირისაკენ: ამ შემთხვევაში ადგილი აქვს სითბოს გადაცემას, სხეულის თბოგამტარობით.

ზეთთან ტრანსფორმატორებში გულანას და გრაგნილებს გარს უყლის ტრანსფორმატორის ზეთი, რომლის დონე გაცივებით უფრო მაღალია, ვიდ-

რე გულანას ზემო დონე. ზეთის ნაწილაკები (ნახ. 216), შეეზება რა გრაგნილების გულანას გახურებულ ზედაპირებს, გახურდება, მიისწრაფვის ზევით და შემდეგ ავზის კედლებისა და ხუთის საშუალებით გადასცენს სითბოს გარემოს. ვაცოდება რა ზეთის ნაწილაკები მიისწრაფვის ქვევით და უთმობენ ადვილს სხვა უფრო გახურებულ ნაწილაკებს. ამ შემთხვევაში სითბოს გადაცემა ხდება კონვექციით. ერთი მხრივ გრაგნილებსა და გულანას და მეორე მხრივ—ზეთის შორის, მყარდება ტემპერატურათა გარკვეული სხვაობა. მაგრამ ზეთის და ტრანსფორმატორის სხვა ნაწილების ტემპერატურა განსხვავებული იქნება სხვადასხვა ზონაში სიმაღლის მიხედვით. ტრანსფორმატორის სხვადასხვა ნაწილების ტემპერატურის ცვლილება სიმაღლის მიხედვით ნაჩვენებია ნახ. 216-ზე.

ავზის კედლებში სითბო გადაის თოგამტარობის გზით. ავზის ზედაპირზე თოგაცემა ხდება, როგორც კონვექციით ე. ი. ჰაერის გახურებული ნაწილაკების საშუალებით, ასევე გამოსხივებით. ავზსა და გარემო ჰაერს შორის ტემპერატურათა სხვაობამ შეიძლება მიაღწიოს რამდენიმე ათეულ გრადუსს ცელსიუსით.

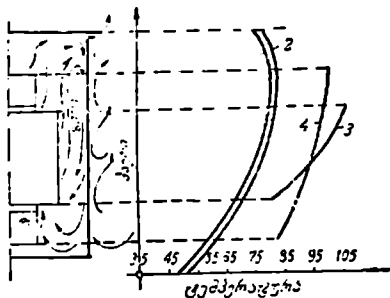
გ) გახურებას და ვაცოდების განტოლება. ტრანსფორმატორში თბური პროცესების სირთულის გამო, მათი მათემატიკური ანალიზის დროს შეიშარათავთ ზოგიერთ გამარტივებას. ამ მიზნით, გრაგნილებსა და გულანას, რომლებიც წარმოადგენს სხვადასხვა მასალების ერთობლიობას, სცვლიან ერთგვაროვანი სხეულებით. ასეთი გამარტივება საყსებით დასაშვებია იმ პირობით, თუ შემცველ ერთგვაროვან სხეულს, ისეთივე გარეგანი ზომების და იმავე რაოდენობის გამოყოფილი სითბოს შემთხვევაში, აქვს ეკვივალენტური თბოტევადობა.

მეორე გამარტივებაა—თბური წრედის ყოველი ელემენტის (გულანა, გრაგნილი, ზეთი, ავზი) გაანგარიშებაში, მისი რაღაც საშუალო ტემპერატურის შემოტანა. მხოლოდ ზეთის ტემპერატურის განსაზღვრის დროს, საშუალო ტემპერატურასთან ერთად აღრიცხავენ აგრეთვე ტემპერატურას მის ზედა ფენებში.

ნახ. 217-ზე მოყვანილია ტრანსფორმატორის ჰორიზონტალურ კვეთში გასაშუალოებულ ტემპერატურების გამარტივებული დიაგრამა.

შემდგომში მივიღოთ აღნიშვნები:

Q—განსახილველ ერთგვაროვან სხეულში, დროის ერთეულში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა. C—სხეულის სრული თბოტევადობა, მ—მოცემულ სხეულსა და გარემოს შორის ტემპერატურათა სხვაობა, K—გამაციფე-



ნახ. 216. ტემპერატურის განაწილება ტრანსფორმატორის სიმაღლეზე. 1—ზეთის ტემპერატურა; 2—ავზის კედლების ტემპერატურა; 3—გრაგნილის ტემპერატურა; 4—გულანას ტემპერატურა.

ბელი ზედაპირიდან დროის ერთეულში გარემოში გადაცემული სითბოს რაოდენობა, როდესაც ზედაპირის და გარემოს ტემპერატურათა სხვაობა უდრის $1^{\circ} C$.

dt დროის ელემენტარულ შუალედში სხეულში გამოყოფილი თბური ენერგია Qdt ნაწილობრივ დაიხარჯება სხეულის ტემპერატურის $d\theta$ მიხედვით აწევაზე, და ნაწილობრივ გადაცემული იქნება გარემო სივრცეში. დროის ნებისმიერ მომენტში აღვიღოთ ენერგია თბური ენერგიის ბალანსს, რომელიც გამოისახება დიფერენციალური განტოლებით:

$$Qdt = C d\theta + K\theta dt. \quad (18,1)$$

დამყარებული თბური პროცესის დროს, როდესაც მიღწეულია სხეულის ტემპერატურის ზღვრული გადამტევა გარემოს ტემპერატურის მიმართ, $C d\theta = 0$, და სხეულში გამოყოფილი მთელი სითბო მოსცილდება მას გამაცივებელი ზედაპირით, ე. ი.

$$Qdt = K\theta dt$$

$$Q = K\theta, \quad (18,2)$$

სადაც θ — ტემპერატურის დამყარებული გადამტევაა.

ჩავსვათ Q (18,2)-დან (18,1) ტოლობაში მივიღებთ:

$$\theta dt = \frac{C}{K} d\theta + \theta dt, \quad (18,3)$$

სადაც $\frac{C}{K}$ აქვს დროის განზომილება. შემდეგში მივიღებთ აღნიშვნას

$$\frac{C}{K} = T.$$

(18,3) განტოლება უფრო მოსახერხებელია წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$dt = \frac{T}{\theta - \theta_0} d\theta.$$

ამ განტოლების საერთო გადაწყვეტას წარმოადგენს

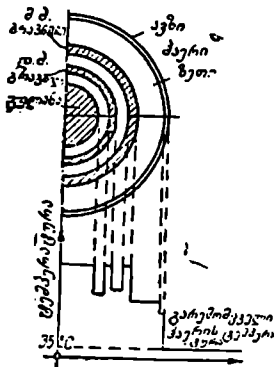
$$t = -T \ln(\theta - \theta_0) + C. \quad (18,4)$$

ინტეგრაციის მუდმივა C განისაზღვრება საწყისი პირობებიდან. თბურ პროცესის დასაწყისში სხეულის ტემპერატურა ტოლია რაღაც საწყისი ტემპერატურის, ე. ი.

$$\text{როდესაც } t=0 \text{ } \theta = \theta_0.$$

ამიტომ

$$C = T \ln(\theta - \theta_0). \quad (18,5)$$



ნახ. 217.

ან

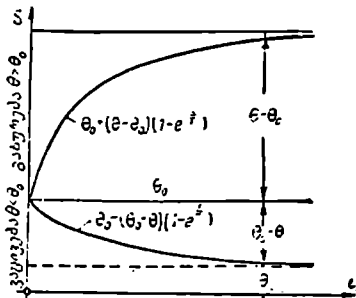
ჩავსვათ რა (18,5)-ს, (18,4)-ში მივიღებთ:

$$\frac{t}{T} = \ln \frac{\Theta - \Theta_0}{\Theta - \psi} \quad (18,6)$$

უბრალო გარდაქმნების შემდეგ ვპოულობთ საბოლოო გამოსახულებას:

$$\psi = \Theta_0 + (\Theta - \Theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (18,7)$$

(18,7) ტოლობა გვაძლევს ტემპერატურათა სხვაობის (ψ) მნიშვნელობას, როგორც გახურების, ასევე გაცივების შემთხვევებისათვის. სხეულის გახურების დროს $Q > Q_0$ და (18,7) ტოლობით განსაზღვრული ტემპერატურის გადამეტება გამოისახება ნახ. 218-ზე მოცემულ ზემო მრუდით. გაცივების შემთხვევაში $\Theta < \Theta_0$ და ტემპერატურის გადამეტების ცვლილება ხდება ნახ. 218-ის ქვედა მრუდით. გახურების (ან გაცივების) საკმაო ხანგრძლიობის



ნახ. 218. გახურების და გაცივების მრუდები.

დროს, როდესაც $t > 3T$, $e^{-\frac{t}{T}}$ ნულისაგან ნაკლებად განსხვავებული ხდება და $\psi \approx \Theta$, ე. ი. იწყება დამყარებული ტემპერატურული პროცესი.

თუ გახურების პროცესის დასაწყისში სხეულს არა აქვს კარბი ტემპერატურა, მაშინ $\Theta_0 = 0$ და

$$\psi = \Theta \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (18,8)$$

თუ სხეული ცივდება კარბი ტემპერატურის სრულ დაკარგვამდე, მაშინ $\Theta_0 = 0$ და

$$\psi = \Theta_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (18,9)$$

როგორც (18,7) ფორმულიდან ჩანს, მისი პრაქტიკული გამოყენებისათვის უნდა ვიცოდეთ, ჯერ-ერთი T სიდიდის მნიშვნელობა, და აგრეთვე, დამყარებულ ტემპერატურათა სხვაობის მნიშვნელობა Θ . ამ სიდიდეების განსაზღვრა მოცემული იქნება ქვემოთ.

ღ) დროის მუდმივა. (18,3)-ის თანახმად $T = \frac{C}{K}$. თბოტევადობა $C = cG$, სადაც c —სხეულის ხვედრითი თბოტევადობაა, ხოლო G —სხეულის წონა. (18,2)-ის თანახმად $K = \frac{Q}{\Theta}$.

ამიტომ

$$T = \frac{cG\Theta}{Q} \text{ sec.} \quad (18,10)$$

T სიდიდეს ეწოდება გახურების დროის მუდმივა. (18,10) ტოლობა განმარტავს მის ფიზიკურ შინაარსს. T არის დრო, რომლის განმავლობაში c ხვედრითი თბოტევადობის მქონე სხეული, სითბოს Q ერთეულის ერთ წამში გამოყოფისას გახურდება $0^{\circ}C$ -ით, იმ პირობით, რომ არა აქვს აღვილი თბოგაცემის გარემო სივრცეში და მთელი გამოყოფილი სითბო იხარჯება მხოლოდ სხეულის გახურებაზე.

გრაგნილის ზეთის მიმართ გახურების პროცესის განხილვისას გრაგნილის დროის მუდმივას იღებენ ტოლს:

$$T_{06} = \frac{(c_M G_M + \xi c_U G_U)}{P_{06}} \Theta_{0M}, \quad (18,11)$$

სადაც c_M —სპილენძის ხვედრითი თბოტევადობაა, G_M —გრაგნილის სპილენძის წონა, P_{06} —დანაქარგები გრაგნილში, Θ_{0M} —გრაგნილისა და ზეთის ტემპერატურათა დამყარებული სხვაობა P_{06} დანაქარგების დროს, c_U —გამტარების იზოლაციის ხვედრითი თბოტევადობა, G_U —გამტარების იზოლაციის წონა, ξ —კოეფიციენტი, რომელიც აღრიცხავს, რომ იზოლაციის ტემპერატურის გადამეტება Θ_{0M} -ზე ნაკლებია. საშუალოდ შეიძლება მიღებულ იქნეს $\xi \approx 0,5$.

ანალოგიურად გამოიანგარიშება გულანას, ზეთის მამართ გახურების დროის მუდმივა:

$$T_c = \frac{c_c G_c \Theta_{cM}}{P_c}, \quad (18,12)$$

სადაც c_c — სატრანსფორმატორო ფოლადის ხვედრითი თბოტევადობაა, G_c — ფოლადის წონა, P_c — დანაქარგები ფოლადში, Θ_{cM} —ფოლადის და ზეთის ტემპერატურათა დამყარებული სხვაობა P_c — დანაქარგების დროს.

მთელი ტრანსფორმატორის, გარემო ჰაერის მიმართ გახურების დროის მუდმივა განისაზღვრება ფორმულით:

$$T_m = \frac{\Sigma c G \Theta}{P_{06} + P_c}, \quad (18,13)$$

სადაც მრიცხველის თითოეული შესაქრები შედგება ტრანსფორმატორის

მასალის დასახელება	$c \left(\frac{W \text{ sec}}{kG \text{ } ^{\circ}C} \right)$
სპილენძი	390
სატრანსფორმატორო ფოლადი (ავზი)	480
სატრანსფორმატორო ზეთი	1800
იზოლაცია	2000

ცალკეული ნაწილის ხვედრითი თბოტევადობის, მისი წონის და ამ ნაწილის ტემპერატურის, ჰაერის ტემპერატურაზე გადამეტების ნამრავლისაგან $-P_{06} + P_c \approx P_K + P_0$ დანაქარგების დროს. ჩვეულებრივად ცალკეულ ნაწილებად მიღებულია გრაგნილი, გულანა, მყარი იზოლაცია, ზეთი და ავზი.

სხვადასხვა მასალების ხვედრითი თბოტევადობის მნიშვნელობები მოყვანილია გვერდზე მოთავსებულ ცხრილში (იხ. აგრეთვე I ნაწილი § 6).

ე) ტემპერატურის გადამეტება დამყარებული რეჟიმის დროს. დამყარებული თბური პროცესის დროს გრაფილის ან გულანას და ზეთის ტემპერატურათა სხვაობა შეიძლება განსაზღვრულ იქნეს ცდის შედეგად მიღებულ შემდეგი დამოკიდებულებიდან:

$$\Theta_{o,m} = k_1 P_{o6}^{n_1}; \quad (18,14)$$

$$\Theta_{c,m} = k_2 P_c^{n_2}. \quad (18,15)$$

ამ ფორმულებში ხარისხის მაჩვენებლები n_1 და n_2 მოთავსებულია ზღვრებში $0,5 \div 0,8$. საშუალოდ ისინი შეიძლება მივიღოთ $2/3$ -ის ტოლად. k_1 და k_2 კოეფიციენტებს თითოეული ტრანსფორმატორისათვის აქვს თავისი მნიშვნელობა და შეიძლება საიმედოდ განსაზღვრულ იქნეს მხოლოდ ცდით (იხ. აგრეთვე 1, § 5). თუ ცდებიდან ცნობილია $\Theta_{o,m}$ და $\Theta_{c,m}$ ტრანსფორმატორის ნომინალური დატვირთვისათვის, როდესაც მასში დანაკარგებს აქვს P_{o6} და P_{cH} მნიშვნელობა, მაშინ ნებისმიერი სხვა დატვირთვისათვის, (18,14) და (18,15)-ის საფუძველზე მივიღებთ:

$$\Theta_{o,m} = \Theta_{o,m} \left(\frac{P_{c6}}{P_{o6H}} \right)^{2/3}, \quad (18,16)$$

$$\Theta_{c,m} = \Theta_{c,m} \left(\frac{P_c}{P_{cH}} \right)^{2/3} \quad (18,17)$$

თანამედროვე ტრანსფორმატორებში ზეთით ბუნებრივი გაცივებისას $\Theta_{o,m} \approx 20 \div 25^\circ C$, $\Theta_{c,m} \approx 20 \div 30^\circ C$. ცდების ზონაცემების თანახმად, ზეთისა და ჰაერის ტემპერატურათა დამყარებული სხვაობა, შეიძლება გამოსახულ იქნეს შემდეგნაირად:

$$\Theta_{m\theta} = k(P_0 + P_k)^{0,8}, \quad (18,18)$$

სადაც P_0 და P_k — უქმი სვლის და მოკლედ შერთვის დანაკარგებია მოცემული დატვირთვის დროს, k — ცდისეული კოეფიციენტი, განსხვავებული სხვადასხვა ტრანსფორმატორებისათვის.

თუ ნომინალური რეჟიმის დროს ცდიდან ცნობილია $(P_0 + P_k)_H$ დანაკარგებისას $\Theta_{m\theta H}$ -ის მნიშვნელობა, მაშინ (18,18)-ის თანახმად მივიღებთ:

$$\Theta_{m\theta} = \Theta_{m\theta H} \left[\frac{P_0 + P_k}{(P_0 + P_k)_H} \right]^{0,8}. \quad (18,19)$$

თანამედროვე ტრანსფორმატორებში ზეთით ბუნებრივი გაცივებით, $\Theta_{m\theta H} \approx 40 \div 45^\circ C$. ზეთის ზემო ფენებში ტემპერატურის გადამეტება საშუალოდ $15 \div 20\%$ -ით მეტია, მის ტემპერატურის საშუალო გადამეტებაზე. (18,18) და (18,19) ფორმულები გამოსადეგია ზეთში ტემპერატურის, როგორც საშუალო ისე მაქსიმალური (ზემო ფენებში) გადამეტებისათვის.

ვ) ტრანსფორმატორის გახურება მისი ცვლადი დატვირთვის დროს. ტრანსფორმატორის ცვლადი დატვირთვის დროს გახურების გამოკვლევას

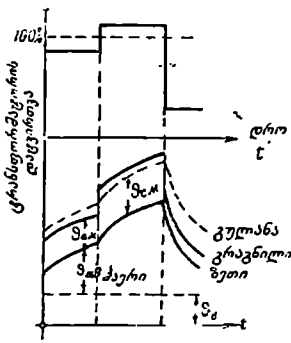
დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს, ვინაიდან ამ დროს შესაძლებლობა გვეძლევა შევადაროთ ხანმოკლე ან მეტად თუ ნაკლებად ხანგრძლივი გადატვირთვების დროს, ტრანსფორმატორის ცალკეული ნაწილების ტემპერატურის აწვევასთან დაკავშირებული იზოლაციის დაჩქარებული გაცვეთის საშიშროების ხარისხი.

თუ მოცემულია ტრანსფორმატორის დატვირთვის გრაფიკი, მას ყოფენ ცალკეულ ინტერვალებად, რომელთა ფარგლებში დატვირთვა შეიძლება მიღებულ იქნეს მუდმივად გარემოს მოცემული $\theta_{\text{მე}}$ ტემპერატურის დროს, სარგებლობენ რა (18,7)-ით, თანმიმდევრობით, ყოველი ინტერვალისათვის განსაზღვრავენ ზეთის საშუალო ტემპერატურის $\theta_{\text{მე}}$ გადამეტების ცვალებადობის მრუდს. შემდეგ იმავე ინტერვალისათვის (18,7)-ის საფუძველზე პოულობენ გრაგნილისა და ზეთის $\theta_{\text{მე}}$, და გულანისა და ზეთის $\theta_{\text{მე}}$ ტემპერატურათა სხვაობის ცვალებადობის მრუდებს. ამის შემდეგ ყველა ინტერვალისათვის აგებენ გრაგნილის $\theta_{\text{მე}} = \theta_{\text{მ}} + \theta_{\text{მე}} + \theta_{\text{მე}}$ და გულანის $\theta_{\text{ც}} = \theta_{\text{მ}} + \theta_{\text{მე}} + \theta_{\text{მე}}$ ტემპერატურათა მრუდებს. ამგვარად, მიღებული მრუდების ხასიათი მოცემულია ნახ. 279-ზე.

მაგალითი. ტრანსფორმატორს, ნომინალური რეჟიმის დროს აქვს $\theta_{\text{მე}} = 40^{\circ}\text{C}$, $\theta_{\text{მე}} = 22^{\circ}\text{C}$. დანაკარგების თანაფარდობა $P_{\text{კ}}:P_0 = 4$. დროის მუდმივები ტოლია: $T_{\text{მ}} = 4$ საათს, $T_{\text{ონ}} = 0,1$ საათს. განახევრებული დატვირთვით ხანგრძლივი მუშაობის შემდეგ, ტრანსფორმატორი 30%-ით იქნა გადატვირთული ნომინალურ სიმძლავრის ზევით, 3 საათის განმავლობაში. საჭიროა ვიპოვოთ ზეთის და გრაგნილების ტემპერატურა გადატვირთვის პერიოდის ბოლოს, თუ გარემო ჰაერის ტემპერატურა $\theta_{\text{მ}} = 20^{\circ}\text{C}$.

ზეთის ტემპერატურის გადამეტება, ხანგრძლივი განახევრებული დატვირთვის დროს ტოლია (18,19) ტოლობის.

ზეთის ტემპერატურის გადამეტება, ხანგრძლივი განახევრებული დატვირთვის დროს ტოლია (18,19) ტოლობის.



ნახ. 219. გახურების და გაცივების მრუდები ტრანსფორმატორის ცვალებადი დატვირთვისას.

$$\theta_{\text{მე}} = 42 \left(\frac{1 + \frac{1}{4} \cdot 4}{1 + 4} \right)^{0,8} = 20,2^{\circ}\text{C}.$$

იმავე პირობებში, გრაგნილების ტემპერატურის გადამეტება ზეთის მიმართ ტოლი იქნება (18,16) ტოლობის

$$\theta_{\text{მე}} = 22 \left(\frac{1}{4} \right)^{1/3} = 8,7^{\circ}\text{C}.$$

30%-ით გადატვირთვის დროს, ზეთის ტემპერატურის საბოლოო გადამეტება ჰაერის მიმართ განისაზღვრება (18,19) ტოლობიდან:

$$\theta'_{\text{მე}} = 42 \left(\frac{1 + 1,3^3 \cdot 4}{1 + 4} \right)^{0,8} = 59,7^{\circ}\text{C}.$$

იმავე პირობებში გრაგნილების ტემპერატურის გადაშეტება ზეთის მიმართ ტოლი იქნება (18,16)-ის

$$\theta'_{\text{ომ}} = 22 \left(\frac{1.3^3}{1} \right)^{2/3} = 31,3^{\circ}\text{C}.$$

გადატვირთვის დაწყებიდან 3 საათის შემდეგ, ზეთის ტემპერატურის გადაშეტება ტოლი იქნება (18,7)

$$\theta_{\text{მ}} = 20,2 + (57,7 - 20,2) \left(1 - e^{-\frac{3}{4}} \right) = 41^{\circ}\text{C}.$$

გრაგნილის დროის მუდმივას შედარებითი სიზციკრის გამო, გრაგნილის გადახურება ზეთის მიმართ 3 საათის შემდეგ იქნება დამყარებული და ტოლი $\theta'_{\text{ომ}} = 31,3^{\circ}\text{C}$.

ამგვარიად, გადატვირთვის პერიოდის ბოლოს, ზეთის საძიებელი ტემპერატურა ტოლი იქნება $20 + 41 = 61^{\circ}\text{C}$, ხოლო გრაგნილის ტემპერატურა $61 + 31,3 = 92,3^{\circ}\text{C}$.

ზ) ტრანსფორმატორის გახურება მოკლედ შერთვის დროს. მოკლედ შერთვის დროს დენი ისე სწრაფად იზრდება, რომ გრაგნილში გამოყოფილი სითბო ჯერ ასწრებს მოცილებას ზეთის საშუალებით და მთლიანად მიდის გრაგნილების გახურებაზე.

დაეუშვათ, რომ მოკლედ შერთვა მოხდა იმ მომენტში, როდესაც გრაგნილების საშუალო ტემპერატურა უდრიდა $\theta_{\text{მ}}$, ამასთან, გრაგნილი მოკლედ შერთვის პერიოდში გახურდა $\theta_{\text{კ}}$ ტემპერატურამდე. ამ შემთხვევაში გრაგნილების ტემპერატურის საშუალო მნიშვნელობა მოკლედ შერთვის პერიოდის განმავლობაში შეიძლება მიღებულ იქნეს $\frac{\theta_{\text{მ}} + \theta_{\text{კ}}}{2}$ -ის ტოლად. თუ $P_{\text{კ}}$ -თი აღ-

ვნიშნავთ მოკლედ შერთვის დანაკარგებს ნომინალური დენისა და $\theta_{\text{მ}}$ ტემპერატურის დროს, მაშინ დანაკარგები მოკლედ შერთვის პერიოდში, გამოთვლილი: $\frac{1}{2}(\theta_{\text{მ}} + \theta_{\text{კ}})$ საშუალო ტემპერატურის მიხედვით ტოლი იქნება:

$$P_{\text{კ}}' = P_{\text{კ}} \left(\frac{100}{\epsilon_{\text{კ}}} \right)^2 \left[1 + 0,003 \left(\frac{\theta_{\text{კ}} - \theta_{\text{მ}}}{2} \right) \right], \quad (18,20)$$

სადაც ტემპერატურული კოეფიციენტი, როდესაც $\theta_{\text{მ}} \approx 90^{\circ}\text{C}$ მიღებულია ტოლი:

$$\alpha = \frac{1}{234,5 + 90} \approx 0,03.$$

თბური ბალანსის განტოლება მოკლედ შერთვის დროს შეიძლება დაწერილ იქნეს შემდეგი სახით:

$$P_{\text{კ}}' \cdot t = (\epsilon_{\text{მ}} G_{\text{მ}} + \epsilon_{\text{კ}} G_{\text{კ}}) (\theta_{\text{კ}} - \theta_{\text{მ}}). \quad (18,21)$$

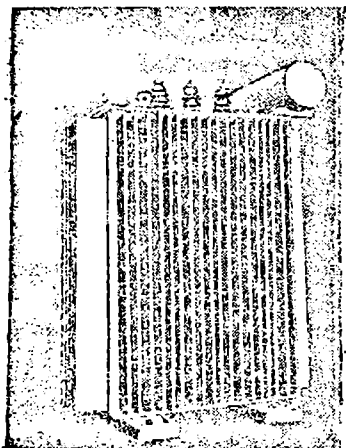
აქედან ვიპოვიოთ t დროს, რომლის განმავლობაში ტრანსფორმატორის გრაგნილები გახურდება $\theta_{\text{კ}}$ -დან $\theta_{\text{მ}}$ -მდე C :

$$t = \frac{(\epsilon_{\text{მ}} G_{\text{მ}} + \epsilon_{\text{კ}} G_{\text{კ}}) (\theta_{\text{კ}} - \theta_{\text{მ}})}{P_{\text{კ}}}. \quad (18,22)$$

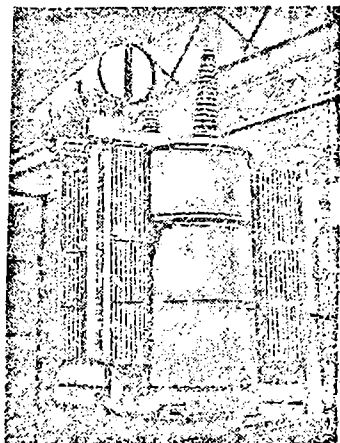
თუ დავუშვებთ, რომ $P_{\kappa} \approx 2,5 \Delta^2 G_{\kappa}$, $c_{\kappa} = 390$, $c_{\mu} = 2000$, $\xi \approx 0,5$, $G_{\mu} : G_{\kappa} \approx 0,08$ და შემოვიღებთ $\varphi_{\kappa} = 90^{\circ}C$, $\varphi_{\mu} = 250^{\circ}C$, მაშინ (18,20) და (18,22)-დან მივიღებთ:

$$t \approx 2,5 \left(\frac{e_{\kappa}}{\Delta} \right)^2 \text{ sec.} \quad (18,23)$$

როგორც (18,23)-დან ჩანს, მცირე ტრანსფორმატორებში, თუ $\frac{e_{\kappa}}{\Delta} \approx 1,5$ მოკლედ ჩართვის დროს გრაგნილების ზღვრული დასაშვები ტემპერატურა



ნახ. 220. ტრანსფორმატორის ავზი ტალღისებური ზედაპირით.



ნახ. 221. ტრანსფორმატორი რადიატორული ავზით.

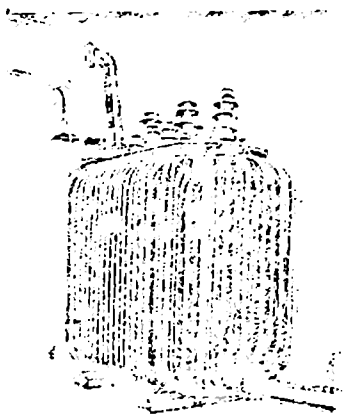
$250^{\circ}C$ მიღწეულ იქნება $\sim 5,5 \text{ sec}$ -ში. დიდ ტრანსფორმატორებში თუ $\frac{e_{\kappa}}{\Delta} \approx 3$, ეს დრო ტოლი იქნება $\sim 25 \text{ sec}$.

თ) ტრანსფორმატორის გაცივების ხერხები. ტრანსფორმატორის გაცივების ყველაზე უფრო ფართოდ გავრცელებული ხერხი—მისი ავზის კედლების, ჰაერით ბუნებრივი გაცივებაა. გამაცივებელი ზედაპირის გაზრდისათვის ავზებს აკეთებენ ტალღისებური ზედაპირით (ნახ. 220), სპეციალური რადიატორებით (ნახ. 221) ან მილოვანს (ნახ. 222). უკანასკნელ ორ ტიპს ამჟამად ყველაზე უფრო მცტი გავრცელება აქვს.

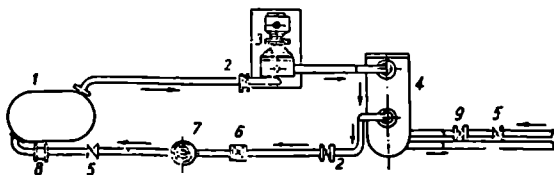
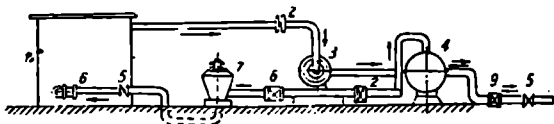
ქვესაღგურებში, სადაც არის მიმდინარე წყალი, დიდი სიმძლავრის

ტრანსფორმატორებს ხშირად დგამენ ხელოვნური წყალზეთიანი გაცივებით (ნახ. 223, ა). ასეთ ტრანსფორმატორში გახურებულ ზეთს ტუმბოს საშუალებით გაატარებენ გამაცივებელში (ნახ. 223, ბ), რომელიც გარშემოშენდება წყლით. შესაძლებელია აგრეთვე კონსტრუქციები კლაკნილას სახით, რომლის გაცივება ხდება ტრანსფორმატორის აუზის შიგნით მოთავსებული წყლით.

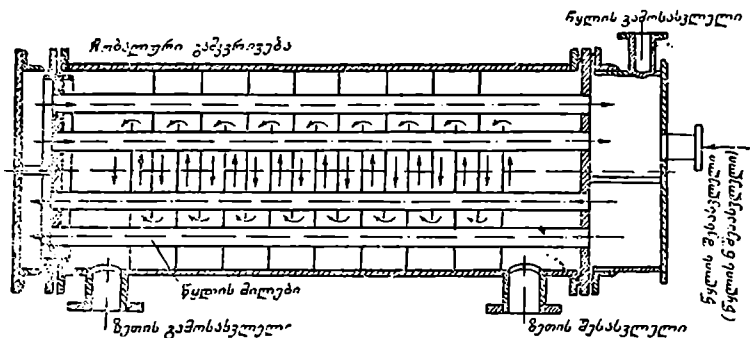
დაბოლოს, ხშირად, განსაკუთრებით მძლავრ ტრანსფორმატორებში აწყობენ ხელოვნური შებერვით გაცივებას (ნახ. 263). ასეთ ტრანსფორმატორში ვენტრილიატორიდან სპეციალური ჰაერსადენით მიღებული ჰაერის ნაკადი უბერავს ტრანსფორმატორის აუზს და რადიატორებს, მნიშვნელოვნად აძლიერებს რა კონვექციით თბოგაცემის პროცესს აუზის ზედაპირზე. გამოიყენება აგრეთვე ყოველი რადიატორის შემობერვა ინდივიდუალური ვენტილიატორით (ნახ. 224). ჩვეულებრივად, ხელოვნური შებერვა გაიანგარიშება იმგვარად, რომ იგი ტრანსფორმატორის სიმძლავრეს დაახლოებით 30%-ით ზრდის.



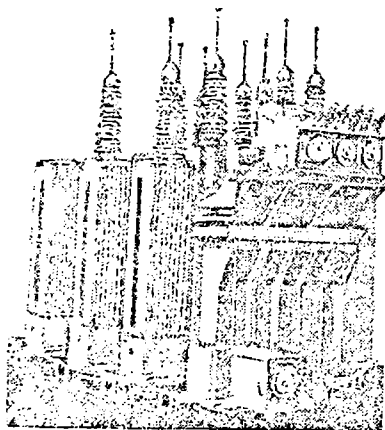
ნახ. 222. ტრანსფორმატორი მილვანი აუზით.



ნახ. 223, ა. ტრანსფორმატორის ხელოვნური წყალზეთიანი გაცივების სქემა. 1—ტრანსფორმატორი; 2—ლუდლოს ურდული; 3—ზეთის ტუმბო ძრავით; 4—გამაცივებელი; 5—სასიგნალო აპარატები; 6—ზეთსახომი; 7—ჰაერგამომყოფი; 8—ფილტრი; 9—წყალსახომი.



ნახ. 223, ბ.



ნახ. 224. ტრანსფორმატორი ინდივიდუალური ვენტილატორით ყოველი რადიატორის ქვეშ.

OCT 2524 ითვალისწინებს ტრანსფორმატორების გაცივების სისტემების შემდეგ კლასიფიკაციას:

გ ა ც ი ე ე ბ ა	ტრანსფორმატორის ტიპი	პირობითი აღნიშვნა
ბუნებრივი ჰაერით, ხელოვნური.	ზეთიანი, ბუნებრივი გაცივებით ზეთიანი, ჰაერით ხელოვნური გაცივებით (შებენით)	M Л B
წყლით ხელოვნური	ზეთიანი, წყლით გაცივებით ზეთიანი, ზეთის იძულებით ცირკულაციით და წყლით გაცივებით	И

ა) მოვლენის ზოგადი დახასიათება. მუშაობის ნორმალურ პირობებში ტრანსფორმატორში მოქმედებს მუშა ძაბვები, რომლებიც არ წარმოადგენს მისთვის საშიშროებას. თანაბრად განაწილებულ გრაგნილიან ტრანსფორმატორში მუშა-ძაბვის განაწილება გრაგნილის გასწვრივ თანაბარზომიერია და მეზობელ ხეაწეებს და კოქებს შორის ძაბვების სხვაობა წარმოადგენს ნულში სიდიდეს.

მაგრამ ექსპლოატაციაში ტრანსფორმატორი ხშირად განიცდის ძაბვების ზემოქმედებას, რომლებიც მნიშვნელოვნად აღემატება ნორმალურ ნუშა ძაბვას და განსხვავდება მისგან

ფორმით. ასეთი გადაძაბვები ხშირად წარმოიშეება თვით სისტემაში, რომელშიც მუშაობს ტრანსფორმატორი; ისინი შეიძლება მივიღოთ, როგორც ნორმალური საკომუტაციო ოპერაციების (ტრანსფორმატორის ჩართვა, ამორთვა), ასევე სისტემაში აღძრული ავარიული პროცესების

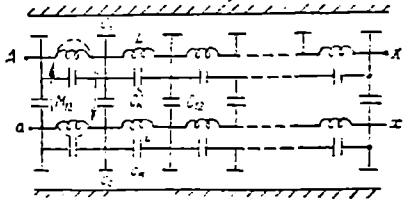


Fig. 225.

შედგად (მაგალითად, მოკლედ შერთვა, შენაცვლებიანი რკალური ჩართვა მ.წაზე სისტემებში იზოლირებული ნეიტრალით და ა. შ). გადაძაბვები შეიძლება აგრეთვე ქეჟა-ქობილის დროს დაცლის შედეგად იყოს, რომელიც ქსელის გამტარებში დაინდუქტირებს მაღალი ძაბვის ელემტრომაგნიტურ ტალღებს.

გადაძაბვებს შეიძლება ქონდეს ან ხანმოკლე ელემტრული იმპულსების, ან პერიოდული ტალღების ხასიათი. ამ დროს სისტემაში ინდუქტივობისა და ტევადობის არსებობის გამო, შესაძლებელია სხვადასხვა სიხშირის ელემტრული რყევების წარმოშობა.

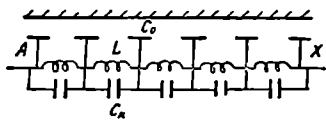
ამ პირობებში ტრანსფორმატორში წარმოშობილი პროცესების გამოსაკვლეად, მისი ჩვეულებრივი შენაცვლების სქემა, მიმდევრობით შეერთებულ ინდუქტივობის და აქტიური წინააღმდეგობის სახით, უკვე არასაკმარისი ხდება. რეალურ ტრანსფორმატორში L ინდუქტივობის და r აქტიური წინააღმდეგობის გარდა, გვაქვს აგრეთვე ტევადობები, როგორც ცალკეულ გრაგნილის ხეაწეებსა და კოქებს შორის, ასევე გრაგნილებს შორის და თითოეულ გრაგნილსა და ტრანსფორმატორის დანიშნულ ნაწილებს შორის. 50 Hz მუშა სიხშირის დროს ამ ტევადობებით გაპირობებული ტევადური წინააღმდეგობა

$$\frac{1}{\omega C}, \text{ ძლიერ დიდია, და ტევადური დენები შეიძლება უგულვებელვით გრავ-$$

ნილის შედარებით მცირე აქტიურ და ინდუქტიურ წინააღმდეგობებში განავალდენტან შედარებით. მაგრამ მაღალი სიხშირეების შემთხვევაში ტრანსფორმატორში არ შეიძლება ტევადური კავშირის უგულვებელყოფა. ამ შემთხვევაში ტრანსფორმატორის შენაცვლების სქემა უფრო რთული ხდება. ასეთი გან-

ზოგადოებული, თუმცა მნიშვნელოვნად გამარტივებული შენაცვლების სქემა ნაჩვენებია ნახ. 225-ზე. ამ სქემაზე AX -ით აღნიშნულია მაღალი ძაბვის გრაგნილი და ax -ით დაბალი ძაბვის გრაგნილი; შემდეგ C_0 , C_1 და L -ით შესაბამისად აღნიშნულია ტევადობა მიწაზე, ტევადობა გრაგნილს გასწვრივ და მაღალი ძაბვის გრაგნილის ინდუქტივობა—სიგრძის ერთეულზე, ხოლო c_0 , c_1 და L -ით—შესაბამისად დაბალი ძაბვის გრაგნილის იგივე სიდიდეები. დასასრულ C_{12} და M_{12} -ით აღნიშნულია ტევადობა გრაგნილებს შორის, და გრაგნილების ურთიერთინდუქტივობა სიგრძის ერთეულზე. ამ სქემაში არ არის მხედველობაში მიღებული გრაგნილების სპილენძის აქტიური წინააღმდეგობა და იზოლაციის ვამპარობა, რომლებიც ჩვენს მიერ განსახილველ მოვლენებში თამაშობს მეორე ხარისხოვან როლს.

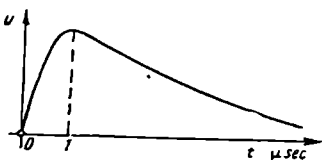
უმეტეს შემთხვევაში, გადაძაბვის პროცესები მაღალი ძაბვის გრაგნილში, შეიძლება განხილულ იქნეს დაბალი ძაბვის გრაგნილის გავლენის აღურიცხავად, რაც მნიშვნელოვნად აადვილებს საკითხის გამოკვლევას და, როგორც ცდამ გეჩვენა ნაკლებად მოქმედებს რეზულტატებზე. ამიტომ ნახ. 225-ის სქემა, შეიძლება შეცვლილ იქნეს ნახ. 226-ის უფრო უბრალო სქემით.



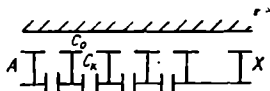
ნახ. 226.

მრავალი წლების დაკვირვებებით დადგენილია, რომ თვით სისტემაში წარმოშობილი გადაძაბვები იშვიათ შემთხვევებში აღემატება ტრანსფორმატორის ფაზური ძაბვის ოთხმაგ მნიშვნელობას. რაც შეეხება ატმოსფერული წარმოშობის გადაძაბვებს, მათ შეიძლება ქონდეთ გაცილებით უფრო დიდი ამპლიტუდა, რომელიც აღწევს ფაზური ძაბვის ათმაგ მნიშვნელობას, თუმცა მათი ხანგრძლიობა გაცილებით ნაკლებია და არ აღემატება რამდენიმე ათეულ მიკროწამს.

ექსპერიმენტალურად დადგენილია, რომ ტრანსფორმატორებისათვის ყველაზე უფრო მეტ საშიშროებას წარმოადგენს ატმოსფერული წარმოშობის



ნახ. 227.



ნახ. 228.

გადაძაბვები. შემდგომში ჩვენ სწორედ მათ მიმართ გამოვიკვლევთ გადაძაბვებს ტრანსფორმატორებში.

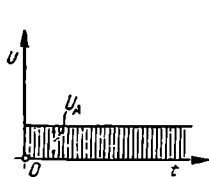
უმეტეს შემთხვევებში ქვეა-ქუხილის დაცლები წარმოადგენს დიდი ამპლიტუდის და, მოქმედების მცირე ხანგრძლიობის აპერიოდულ ელექტრულ იმპულსებს. ასეთი იმპულსის დაახლოებითი ფორმა ნ. ჩვენებია ნახ. 227 ზე. ასეთი იმპულსის (ტალღის) მოქმედების დრო გაიზომება მიკროწამებში ან

ათეულ მიკროწამებში, ხოლო ძაბვის აწევის დრო ნულიდან მაქსიმუმამდე (შონაკვეთი 01 ნახ. 227-ზე) გაიზომება მიკროწამების მეთოდ და შეასგელ ნაწილებითაც კი.

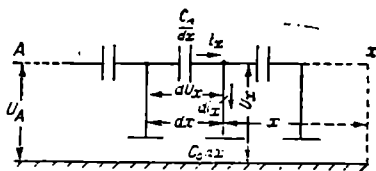
მრუდის ამ ნაწილს ეწოდება ტალღის ფრონტი. ელექტრული იმპულსის ასეთი ციკაბო ფრონტი ჩვენ შეგვიძლია განვიხილოთ, როგორც ძალიან მაღალი სიხშირის ($f \approx 10^{11} \div 10^{12} \text{ Hz}$) პერიოდული პროცესის ზეოთხედი პერიოდი. ამიტომ, ტალღის ფრონტის გავლის დროის განმავლობაში ჩვენ შეგვიძლია უგულვებლევოთ ტრანსფორმატორის ინდუქტიობები და ნახ. 226-ის სქემის მაგიერად განვიხილოთ უფრო უბრალო სქემა ნახ. 228. ცდა გვიჩვენებს, რომ ყველაზე უფრო საშიში გადაძაბვები ტრანსფორმატორში, გაპირობებულია ციკაბო ფრონტის მკონე ტალღების წარმოშობით და ამასთან დაკავშირებულ შემდგომი პროცესებით.

ბ) ძაბვის ხაწყისი განაწილება. გამოვიკვლიოთ ძაბვის განაწილება ტრანსფორმატორის გრაგნილში გადაძაბვის ტალღის შორბენის დროს. თვალსაჩინოებისათვის განვიხილოთ სწორკუთხა უსასრულოდ გრძელი ტალღა (ნახ. 229).

პროცესის საწყისი სტადიის გამოსაკვლეად ვისარგებლოთ ნახ. 228-ის შენაცვლების სქემით. ვთვლით რა ტრანსფორმატორის ტეეადობებს თანაბრად განაწილებულად გრაგნილის მთელ სიგრძეზე, გამოვეოთ გრაგნილის



ნახ. 229.



ნახ. 230.

ბოლოდან x მანძილზე dx ელემენტი (ნახ. 230). თუ ამ ელემენტის ძაბვა მიწის მიმართ ტოლია U_x -ის, მაშინ dx უბანზე ძაბვა dU_x -ის ტოლია. dx ელემენტის ტეეადობა მიწის მიმართ ტოლი იქნება $C_0 dx$, ხოლო ტეეადობა ელემენტის ბოლოებს შორის $\frac{C_k}{dx}$.

უშუალოდ ნახ. 230-დან გამომდინარეობს, რომ ნებისმიერი x სიხშირის დროს

$$dU_x = \frac{1}{\omega C_k} i_x^2 dx; \quad (19,1)$$

$$U_x = \frac{1}{\omega C_0} \frac{di_x}{dx}. \quad (19,2)$$

განსაზღვრავთ რა (19,1)-დან $\frac{d^2x}{dx^2}$ და ჩავსვათ მას (19,2)-ში მივიღებთ:

$$-\frac{d^2 U_x}{dx^2} - \frac{C_0}{C_k} U_x = 0. \quad (19,3)$$

ეს განტოლება სამართლიანია ნებისმიერი x სიხშირისათვის, და მაშა-
საღამე, ციკაბო ფრონტის შქონე უსასრულოდ გრძელი ტალღისათვისაც.

(19,3) განტოლების კერძო ამოხსნას აქვს სახე: $U_x = A e^{ax}$.

ჩავსვათ რა ამ მნიშვნელობას (19,3)-ში მივიღებთ $a^2 - \frac{C_0}{C_k} = 0$, საი-
დანაც:

$$a = \pm \sqrt{\frac{C_0}{C_k}} = \pm \alpha. \quad (19,4)$$

ამგვარად, (19,3) განტოლების სრულ ამოხსნას აქვს სახე:

$$U_x = A e^{ax} + B e^{-ax}. \quad (19,5)$$

ინტეგრირების ნულშივები განსაზღვრულ უნდა იქნეს სასაზღვრო პირო-
ბებიდან. ეს პირობები განსხვავებული იქნება გრაგნილის დამიწებულ და
იზოლირებული ბოლოების შემთხვევებისათვის. როდესაც ბოლო დამიწებუ-
ლია, (ვთვლით რა გრაგნილის სიგრძეს ერთეულის ტოლად) გვექნება შემ-
დეგი სასაზღვრო პირობები:

$$\text{როდესაც } x=0 \quad U_x=0;$$

$$\text{როდესაც } x=1 \quad U_x=U_A^1.$$

გამოვიყენებთ რა პირველ სასაზღვრო პირობას, ვღებულობთ

$$\begin{cases} A+B=0; & A=-B; \\ U_x = A(e^{ax} - e^{-ax}). \end{cases} \quad (19,6)$$

ნეორე სასაზღვრო პირობა გვაძლევს

$$A = \frac{U_A}{e^x - e^{-x}}. \quad (19,7)$$

ჩავსვათ რა (19,7)-ს (19,6)-ში, ვღებულობთ

$$U_x = U_A \frac{e^{ax} - e^{-ax}}{e^x - e^{-x}} = U_A \frac{\text{sh } ax}{\text{sh } x}. \quad (19,8)$$

¹ ტრანსფორმატორზე ტალღის მორბენის დროს იგი აირეკლება გაორკეცებული ამპლი-
ტუდით: ამიტომ U_A , სწორკუთხა მომრბენი ტალღის ამპლიტუდის გაორკეცებული მნიშვნელო-
ბის ტოლია.

(19,8) განტოლებით გამოსახული დამოკიდებულება, α -ს სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის ნაჩვენებია ნახ. 231-ზე. თანამედროვე ტრანსფორმატორებისათვის α მთავრებულია ზღვრებში ($5 \div 15$).

იმ შემთხვევაში, როდესაც გრაგნილის ბოლო დაუმიწებელია, ადგილი აქვს შემდეგ სისაზღვრო პირობებს:

$$\begin{aligned} \text{როდესაც } x=0 & \quad i_x=0; \\ \text{როდესაც } x=1 & \quad U_x=U_A \end{aligned}$$

პირველი პირობიდან (19,1) განტოლების შესაბამისად ვპოულობთ:

$$\frac{dU_x}{dx} = \alpha A - \alpha B = 0; \quad A = B;$$

$$U_x = A(e^{2x} + e^{-2x}). \quad (19,9)$$

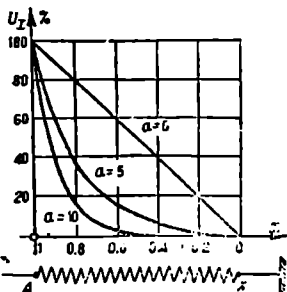
მეორე პირობიდან ვღებულობთ:

$$A = \frac{U_A}{e^\alpha + e^{-\alpha}}. \quad (19,10)$$

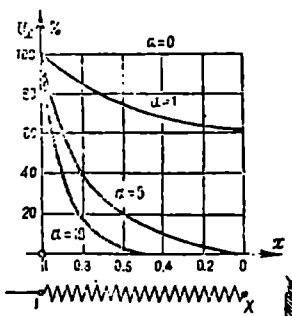
ჩავსვათ რა (19,10)-ს (19,9)-ში, ვღებულობთ:

$$U_x = U_A \frac{e^{2x} + e^{-2x}}{e^\alpha + e^{-\alpha}} = U_A \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{ch} \alpha}. \quad (19,11)$$

(19,11) ტოლობით გამოსახული დამოკიდებულება ნაჩვენებია ნახ. 232-ზე.



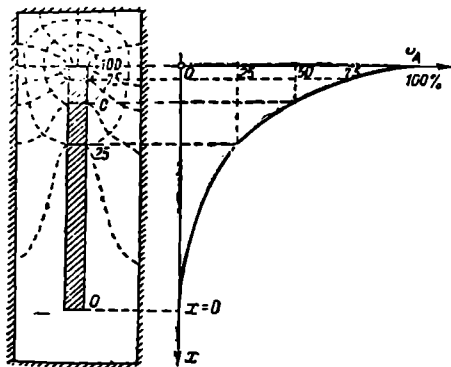
ნახ. 231. ძაბვის საწყისი განაწილება, ტრანსფორმატორში დამიწებული წეიტრალით, სწორკუთხა ფორმის ტალღის გავლისას.



ნახ. 232. ძაბვის საწყისი განაწილება ტრანსფორმატორში იზოლირებული წეიტრალით, სწორკუთხა ფორმის ტალღის გავლისას.

ნახ. 231 და 232-ის შედარება გვიჩვენებს, რომ α -ს დიდი მნიშვნელობებისათვის, გრაგნილის, როგორც დამიწებული, ისე იზოლირებული ბოლო

შემთხვევაში, სწორკუთხა უსასრულოდ გრძელი ტალღის ზემოქმედებისას პირველ მომენტში ძაბვის განაწილება დაახლოებით ერთნაირი იქნება. ძაბვის ამ განაწილებას ეწოდება საწყისი განაწილება, ვინაიდან იგი მყარდება ტალღის ზემოქმედების საწყის მომენტში, როდესაც დენი არ გადის ინდუქტიობებში. ნახ. 231 და 232 გვიჩვენებს, რომ ძაბვის საწყისი განაწილება გრაგნილში უკიდურესად არათანაბარია. განსაკუთრებით მკვეთრად იცვლება ძაბვა გრაგნილის დასაწყისთან, რაც კმნის ძაბვითა მნიშვნელოვან სხვაობებს მებოძებლ ხვევებსა და კოქებს შორის, და აგრეთვე ელექტრულ არეს მკვეთრ უთანაბრობას ტრანსფორმატორის დამიწებულ ნაწილებსა და გრაგნილს შორის იზოლაციაში (ნახ. 233). ეს პოვლენები საშიშია ტრანსფორმატორის იზოლაციისათვის და ხშირად წარმოადგენს ავარიის მიზეზს.



ნახ. 233. ელექტრული არე ტრანსფორმატორში ძაბვის საწყისი განაწილების დროს.

გ) ელექტრული რყევები გრაგნილში.

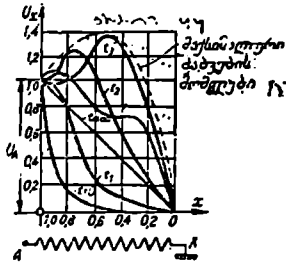
სწორკუთხა ტალღის ზემოქმედების დაწყებიდან რაღაც დროის შუალედის შემდეგ, გრაგნილის ყოველი წერტილი, ტალღის მუდმივი ძაბვის მოქმედების შედეგად იძენს გარკვეულ დამყარებულ პოტენციალს. დამიწებულბოლოიანი თანაბრად განაწილებული გრაგნილის შემთხვევაში, გრაგნილის პოტენციალები მიწის მიმართ იცვლება სწორხაზოვანი კანონის მიხედვით (ნახ. 234 $t = \infty$). იზოლირებულ ბოლოიანი გრაგნილის შემთხვევაში, მთელი გრაგნილი აღმოჩნდება გადაძაბვის ტალღის პოტენციალის ქვეშ (ნახ. 235 $t = \infty$) ძაბვის ამ განაწილებას დამყარებული ან საბოლოო განაწილება ეწოდება.

საწყისი განაწილებიდან ($t=0$) საბოლოო განაწილებისაკენ ($t=\infty$) გადასვლის პროცესში, როდესაც გრაგნილის ტევადობის გარდა თავს იჩენს მისი ინდუქტიობებიც, ტრანსფორმატორი წარმოადგენს დიდი რაოდენობის რყევადი კონტურების ერთობლიობას. ამიტომ ძაბვის საწყისი განაწილებიდან გადასვლა საბოლოოსაკენ გრაგნილში ხდება რყევების გზით. ამ რყევების ხასიათი, მათი ამპლიტუდა და ხანგრძლიობა დამოკიდებულია ტრანსფორმატორის პარამეტრებზე.

ნახ. 234-ზე ნაჩვენებია დამიწებულბოლოიანი გრაგნილში ძაბვის განაწილება, გარდამავალი პროცესის სხვადასხვა მომენტებში ($0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < \infty$). ნახ. 235-ზე ძაბვის იგივე განაწილება ნაჩვენებია შემთხვევისათვის, როდესაც გვაქვს გრაგნილი იზოლირებული ბოლოთი. ნახ. 234 და 235-ზე

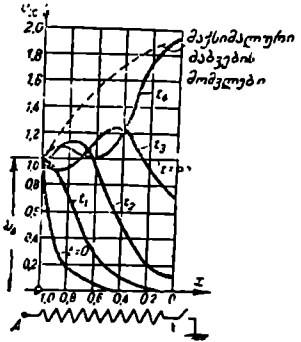
პუნქტორით ნაჩვენებია, რყევის პროცესში გრაგნილის ცალკეულ წერტილებში წარმოშობილ, მიწის მიმართ მაქსიმალურ ძაბვების მომენტები მრუდები.

მრუდები გვიჩვენებს, რომ რყევის პროცესში გრაგნილის ცალკეული წერტილები შეიძლება აღმოჩნდეს უფრო მაღალი ძაბვის ქვეშ, ვიდრე გრაგნილის ხაზური ბოლოს ძაბვა. ამ დროს გრაგნილის სხვადასხვა წერტილებს შორის ძაბვათა სხვაობაც ასევე შეიძლება აღმოჩნდეს ძალიან დიდი.



ნახ. 234. ძაბვის განაწილება დროის სხვადასხვა მომენტებისათვის ტრანსფორმატორში. გრაგნილის დამიწებულ ბოლოთა.

ტრანსფორმატორზე სასრულო სიგრძის, სასრულო ციკაბობების ფორტის მქონე ტალღის დაცემის დროს, როგორც ამას იძვარი აქვს სინამდვილეში, მოვლენის საერთო ხასიათი იგივე რჩება, მაგრამ ცალკეული პროცესები ნაკლებად მეკეთრადაა გაშსახული. გადაძაბვის ტალღის ჩაქრობასთან, თიოქმის ერთდროულად, ჩაქრება ყველა რყევები გრაგნილის შიგნით. ტრანსფორმატორზე პერიოდული ტალღის დაცემის დროს შესაძლებელია რეზონანსის მოვლენები, დამცემი ტალღის რყევებსა, და გრაგნილის საკუთარ რყევებს შორის. მაგრამ პრაქტიკაში პერიოდული ტალღები შედარებით მცირე ამპლიტუდისაა, ასე, რომ რეზონანსის მოვლენები არ წარმოადგენს დიდ საშიშროებას.



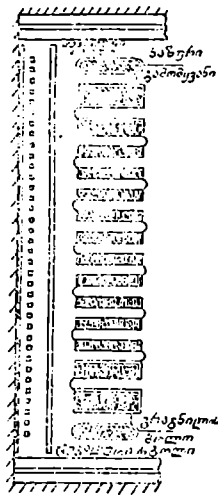
ნახ. 235. ძაბვების განაწილება დროის სხვადასხვა მომენტებისათვის. ტრანსფორმატორში, გრაგნილის იზოლირებული ბოლოთი.

დ) ტრანსფორმატორების დაცვა გადაძაბვებისაგან. გადაძაბვები ტრანსფორმატორებში ხშირად წარმოადგენს მათი მწყობრიდან გამოსვლის მიზეზს. ამიტომ მრავალწლიანი პრაქტიკის შედეგად გამოუმუშავებულია რიგი ზომებისა, ტრანსფორმატორების გადაძაბებიდან დაცვისათვის. ტრანსფორმატორის გარეთ, გადაძაბვების დაწევის საშუალებებს ჩვენ არ განვიხილავთ, ვინაიდან ეს წარმოადგენს გადაძაბვების სპეციალური კურსის საგანს. ქვემოთ განხილული იქნება მხოლოდ ტრანსფორმატორის გრაგნილებს შიგნით გადაძაბვებისაგან დაცვის საშუალებები.

1. გრაგნილი შესავალი კოჭების გაძლიერებული იზოლაციით. ტრანსფორმატორის გადაძაბვებისაგან დაცვის ერთ-ერთ, პრაქტიკაში ფართოდ გამოყენებულ საშუალებას წარმოადგენს გრაგნილის ბოლოებთან უშუალო სიახლოეში განლაგებული ხვევებისა და

ვის ერთ-ერთ, პრაქტიკაში ფართოდ გამოყენებულ საშუალებას წარმოადგენს გრაგნილის ბოლოებთან უშუალო სიახლოეში განლაგებული ხვევებისა და

კოქების გაძლიერებული იზოლაცია. დაცვის ამ საშუალების მიზანშეწონილობა უშუალოდ გამომდინარეობს ნახ. 234 და 235-ის განხილვიდან. კოქების და



ნახ. 236. გრაგნილი, საწყისი და ბოლო კოქების გაძლიერებული იზოლაციით.

ხვევების იზოლაცია საკმარისი უნდა იყოს იმისათვის, რომ გაუძლოს მათ შორის წარმოშობილ ძაბვათა დიდ სხვაობებს. გრაგნილი, საწყისი და ბოლო კოქების გაძლიერებული იზოლაციით, სქემატურად ნაჩვენებია ნახ. 236-ზე. ტრანსფორმატორებში, ყრუდ, პუდმივად დამიწებული ნეიტრალით, კმაყოფილებიან ხაზური ბოლოს კოქების და ხვევების გაძლიერებული იზოლაციათ.

2. ტევადური რგოლი. მეორე საშუალება, რომელმაც ფართო პრაქტიკული გამოყენება პოვა, არის ეგრეთწოდებული ტევადური რგოლის მოწყობა. ტევადური რგოლი წარმოადგენს ლითონის ან მოლითონებულ რგოლისებურ ფირფიტას, რომელსაც იგივე რადიალური ზომები აქვს, რაც გრაგნილს (ნახ. 236). სათანადო იზოლირებული ტევადური რგოლი მოთავსდება გრაგნილის ზემოთ მასთან უშუალო სიახლოეში, და მიუერთდება გრაგნილის ხაზურ ბოლოს. წარმოადგენს რა ეკვიპოტენციალურ ზედაპირს, ტევადური რგოლი, ასუსტებს ელექტრულ

არეს უთანაბრობას გრაგნილის საწყის ნაწილში, და ამით აუფჯობესებს ძაბვის საწყის განაწილებას პირველ კოქებსა და მათ ხვევებს შორის (ნახ. 237).

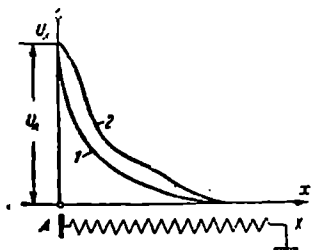
3. შემტანი გრაგნილის შუაში. იმავე მიზანს ელექტრულ არეს გათანაბრებას, გარკვეულ ფარგლებში ემსახურება გრაგნილში შემტანის მოწყობა, არა ბოლოში, არამედ შუაში. როდესაც შემტანი გრაგნილის ბოლოშია, როგორც ნახ. 233-ზე ჩანს, ხაზურ ბოლოზე ადგილი აქვს ელექტრულ არეს ძლიერ კონცენტრაციას, რაც ართულებს გრაგნილის ამ ნაწილის განმხოლოებას ღეროსა და უღლისაგან და ჰქმნის ხელსაყრელ პირობებს საიზოლაციო ცილინდრების გასწვრივ ზედაპირული დაცლებისათვის უღელზე. ზედაპირული დაცლებისათვის გზის გადასაღობად გვიხდება ტრანსფორმატორის იზოლაციის გართულება ეგრეთწოდებული კუთხური საყელურების გამოყენებით. ნახ. 238-ზე სქემატურად ნაჩვენებია თანამედროვე მალაღლოტიანი ტრანსფორმატორის იზოლაციის კონსტრუქცია კუთხური საყელურების გამოყენებით. როდესაც შემტანი გრაგნილის შუაში მოთავსებული (ნახ. 239), ეიღებთ არეს რამდენადღე უფრო ხეოსაყრელ სურათს. ამასთან ერთად მნიშვნელოვნად იზრდება მანძილი შემტანიდან უღლაძედ. ამ შემთხვევაშიც ხმარობენ ტევადურ რგოლს, ათავსებენ რა მას შემტანთან გრაგნილის შუაში.

4. გრაგნილის ფორმის შეცვლა. გადაძაბვებისაგან დაცვის კონსტრუქციული საშუალებებიდან უნდა აღვნიშნოთ ტრანსფორმატორში კოქების

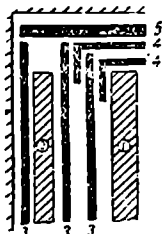
რაოდენობის შემცირება, ერთდროულად ხვევების რაოდენობის გაზრდით (კალკულ კოქაში. ეს გვაძლევს კონსტრუქციულად დაბალ ტრანსფორმატორს განიერი კოქებით, რასაც მიყვება კოქებს შორის C_2 ტვეადობის გაზრდასთან და ერთდროულად მიწის მიმართ გრაგნილის C_0 ტვეადობის შემცირებასთან. სხვაგვარად რომ ვთქვათ, მცირდება α კოეფიციენტი, ე. ი. ძაბვის საწყისი განაწილების ციკაბობა (ნახ. 240). თუმცა გრაგნილის სიმალის შემცირება და კოქას რადიალური ზომის გაზრდა შეიძლება მხოლოდ გარკვეულ ზღვრამდე, ვინაიდან ეს დაკავშირებულია მოკლედ შერთვის ძაბვის გაზრდასთან.

ე) არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორი. გადაძაბვებიდან შინაგანი დაცვის ყველაზე უფრო სრულყოფილ საშუალებას წარმოადგენს არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის მოწყობა. ასეთი ტრანსფორმატორის სახელწოდება დაკავშირებულია იმასთან, რომ მასში ადგილი არა აქვს საკუთარ ელექტრულ რყევებს.

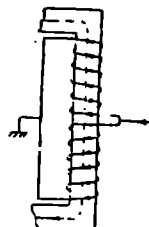
ზემოთ ჩვენ დავინახეთ, რომ გადაძაბვების დროს ტრანსფორმატორში რყევის მიზეზს წარმოადგენს ის, რომ გრაგნილში ძაბვის საწყისი და საბოლოო განაწილება არათანხვდენილია. არამარეზონირებელ ტრანსფორმატორში უზრუნველყოფილია ძაბვის სწორხაზოვანი საწყისი და საბოლოო განაწი-



ნახ. 237. ძაბვის სამაგალითო საწყისი განაწილება ტრანსფორმატორში. 1—როდესაც არ არის ტვეადური რგოლი; 2—ტვეადური რგოლის შემთხვევაში.



ნახ. 238. მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორის იზოლაციის კონსტრუქცია. 1 და 2—მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილი; 3—საიზოლაციო ცილინდრები; 4—საიზოლაციო კუთხოვანა საყუდურები; 5—უღლის იზოლაცია.



ნახ. 239. ტრანსფორმატორი შემტანით გრაგნილის შუაში.

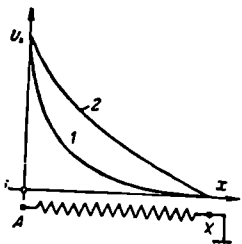
ლება (ნახ. 241). მაშასადამე, არამარეზონირებელ ტრანსფორმატორში ნებისმიერი ფორმის ტალღის დაცემის დროს შინაგანი რყევა შეუძლებელია.

ძაბვის სწორხაზოვანი საწყისი განაწილება, რომელიც უზრუნველყოფს თანაბარ განაწილებას კოქებსა და ხვევებს შორის, უფლებას გვაძლევს აგრეთვე, გრაგნილის დამიწებული ბოლოს მიმართულებით თანაბრად შევამციროთ კოქებსა და გულანას შორის საიზოლაციო მანძილები. ამის გამო ელექტრული არე მთავარ იზოლაციაში გათანაბრდება და მცირდება საიზოლაციო ცი-

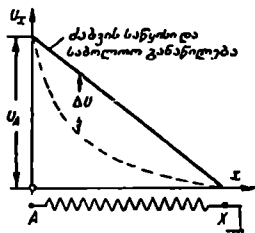
ლმდრების გასწვრივ ზედაპირული დაცილების წარმოშობის შესაძლებლობა.

ძაბვის არათანაბარი საწყისი განაწილების მიზეზს წარმოადგენს კოქეზის ტევადობა მიწის მიმართ, რომელიც იწვევს ძაბვის დამატებით შემცირებას— ΔU (ნახ. 241). არამარეზონირებელ ტრანსფორმატორში ძაბვის ეს შემცირება კომპენსირდება.

ნახ. 242-ზე ნაჩვენებია არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის ზოგადი სქემა. ამ სქემაზე C_x და C_0 —საკუთარი კოქათაშორის ტევადობები და გრაგნილის ტევადობებია მიწის მიმართ, C_1 —დამატებითი ტევადობები, რომელთა საშუალებითაც გადაეცემა გრაგნილს საჭირო დამატებითი მუხტი ΔU ძაბვის დაწვევის კომპენსაციისათვის. ეს ტევადობები, C_{uu} ტევადობათა სისტემის საშუალებით დაკავშირებულია A ხაზურ ბოლოსთან, რომელიც კვებას გრაგნილის მთელ ტევადურ სისტემას.



ნახ. 240. ძაბვის საწყისი განაწილება ტრანსფორმატორში; 1—ვიწრო კოქების დიდი რაოდენობისას; 2—განიერი კოქების მცირე რაოდენობისას.



ნახ. 241. ძაბვის საწყისი და საბოლოო განაწილება არამარეზონირებელ ტრანსფორმატორში.

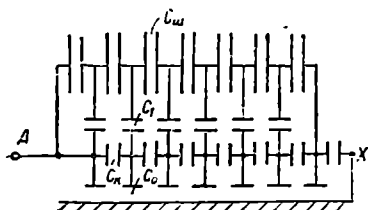
წამოვადებენ მოთხოვნილებას, რომ ძაბვის საწყისი განაწილება იყოს სწორხაზოვანი, ე. ი. დავდეთ პირობა

$$U_x = U_0 x. \quad (19,12)$$

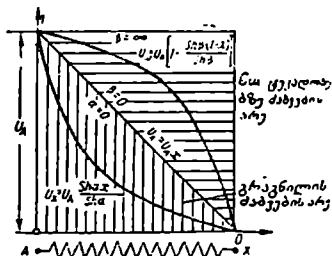
მაშინ ნახ. 242-ის თანახმად C_{uu} ტევადობებზე ძაბვების განაწილება ზოგად შემთხვევაში არ შეიძლება იქნეს სწორხაზოვანი. დაყენებული იმოცანის არსის მიხედვით, C_{uu} ტევადობების პოტენციალები მეთი უნდა იქნეს გრაგნილის შესაბამისი წერტილების პოტენციალებზე. ნახ. 243-ზე 1—0 ხაზით გამიჯნულია ძაბვების არეები გრაგნილში და ტევადობებზე. ნახ. 242 და 243-ის შესაბამისად ძაბვის განაწილება ტევადობებზე შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს შემდეგი სახით

$$U_{xx} = U_0 \left[1 - \frac{\text{sh } \beta(1-x)}{\text{sh } \beta} \right], \quad (19,13)$$

სადაც β — კოეფიციენტი, რომელიც განსაზღვრავს C_1 და C_0 ტევადობების დაძვირებულ მნიშვნელობას და $U_{\text{თ}} = f(x)$ მრუდის ხასიათს.



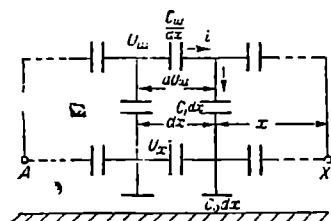
ნახ. 242. არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის შენაცვლების ზოგადი სქემა.



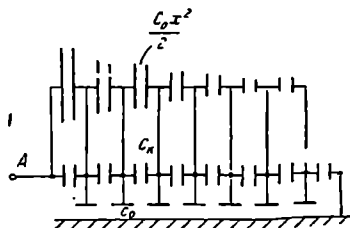
ნახ. 243. გრადიენტში და ტევადობებზე დაძვირების არეები.

განვსაზღვროთ C_1 და C_0 -ს, (19,12) პირობის დაცვისათვის საჭირო მნიშვნელობები. $C_{\text{თ}}$ ტევადობის განსაზღვრისათვის ნახ. 224-ის თანახმად გადავქვს პირობა:

$$dU_{\text{თ}} \frac{\omega C_{\text{თ}}}{dx} = i; \text{ სადაც } \omega \text{ — ნებისმიერი სიხშირეა.}$$



ნახ. 244.



ნახ. 245. არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის შენაცვლების სქემა, როდესაც $\beta=0$.

ამ ტოლობიდან (19,13)-ის საფუძველზე ვპოულობთ

$$C_{\text{თ}} = \frac{i}{\omega \frac{dU_{\text{თ}}}{dx}} = \frac{ish\beta}{\omega U_A \beta ch\beta (1-x)}. \quad (19,14)$$

ნახ. 244-დან გამომდინარეობს რომ

$$i = \int_0^x (U_{\text{თ}} - U_x) \omega C_1 dx = U_A \int_0^x \omega C_0 dx = U_A \omega C_0 \frac{x^2}{2}. \quad (19,15)$$

ჩატვანთ რა (19,15)-ს (19,14)-ში მივიღებთ:

$$C_{uu} = \frac{C_0 x^2 \operatorname{sh} \beta}{2\beta \operatorname{ch} \beta (1-x)} \quad (19,16)$$

C_1 ტვეადობა განისაზღვრება (19,15) ტოლობიდან და პირობებიდან (19,12) (19,13).

$$C_1 = \frac{U_A C_0 x}{U_{uu} - U_x} = C_0 \frac{x}{1 - \frac{\operatorname{sh} \beta (1-x)}{\operatorname{ch} \beta}} \quad (19,17)$$

ნახ. 243-ის მიხედვით ავიღოთ β -ს ორი უკიდურესი მნიშვნელობა.

როდესაც $\beta = 0$, (19,16)-ის თანახმად განუზღვრელობის გახსნის შემდეგ მივიღებთ:

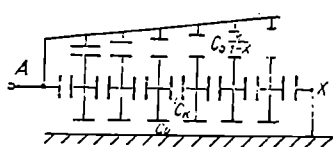
$$U_{uu} = U_A x; C_{uu} = -\frac{C_0 x^2}{2}; C_1 = \infty \quad (19,18)$$

არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის ზოგადი სქემის (19,17) ტოლობის შესაბამისი მოდიფიკაცია ნაჩვენებია ნახ. 245-ზე.

როდესაც $\beta = \infty$, ვღებულობთ.

$$U_{uu} = U; C_{Au} = \infty; C_1 = C_0 \frac{x}{1-x} \quad (19,19)$$

არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის, ამ კერძო შემთხვევის შესაბამისი სქემა ნაჩვენებია ნახ. 246-ზე.



ნახ. 246. არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის შენაცვლების სქემა, როდესაც $\beta = \infty$.

ასეთი ორი ზღვრული სახით: არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის იდეა პირველად მოცემულ იქნა ამერიკაში ინჟინერ ვალის მიერ (I. M. Weed)

ამერიკის ტრანსფორმატორთმშენებლობის პრაქტიკაში გამოყენება პოვა ინჟ. კ. პალუევის მიერ დამუშავებულმა სქემამ (ნახ. 246). C_1 ტვეადობა იქმნება სპეციალური ელექტრო-

სტატიკური ეკრანით, რომელიც გარს ერტყმის გრაგნილს და მიერთებულია მის დასაწყისთან. ეკრანი ისეთნაირად არის შესრულებული, რომ ხაზური ბოლოდან დაშორებით ტვეადობა C_1 მცირდება. ასეთი არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორი სქემატურად ნაჩვენებია ნახ. 247-ზე. ნახ. 248-ზე მოცემულია GEC ფირმის ასეთი ტრანსფორმატორის გარე ხედი.

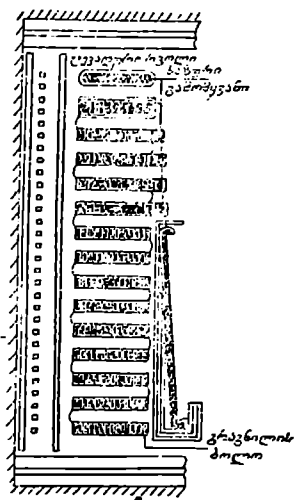
საბჭოთა ტრანსფორმატორთმშენებლობაში გამოყენება პოვა ნახ. 245-ზე მოყვანილმა სქემამ. ტვეადობები კონსტრუქციულად შესრულებულია ბრტყელი რგოლისებური კონდენსატორების სახით, რომლებიც მოთავსებულია კოქებს შორის ჰორიზონტალურ არხებში¹. ამით ავტომატურად იქმნება

¹ ამ წინადადების ავტორია ინჟ. ე. ვ. პანოვი. არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის კონსტრუქცია დამუშავებულია ინჟ. მ. ვ. ლიპკოვსკის მიერ.

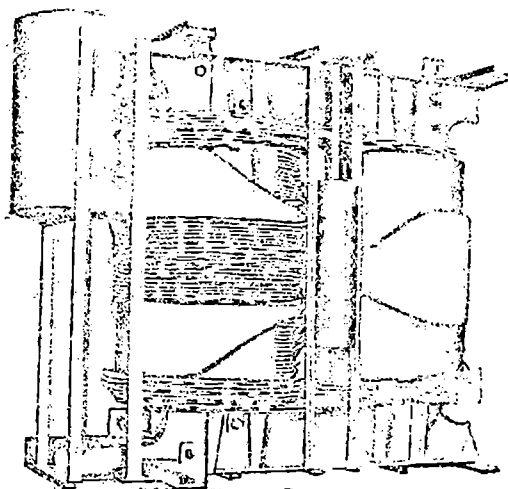
ტვედური კავშირი *Cu* კონდენსატორებსა და კოქებს შორის, და აღარ არის პათ შორის სპეციალური შეერთებების აუცილებლობა.

საბჭოთა კონსტრუქციის არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორი ნაჩვენებია ნახ. 249-ზე, ხოლო ნახ. 250-ზე მოყვანილია ასეთ ტრანსფორმატორში მიწის მიმართ გადაძაბვების ოსცილოგრამების ოჯახი, გადაღებული გრაგნილის სხვადასხვა წერტილებში. ეს ოსცილოგრამები გვიჩვენებს, რომ ძაბვის ტალღის ამპლიტუდა მცირდება გრაგნილის ხაზური ბოლოდან მანძილის დაახლოებით პროპორციულად; ძაბვის ტალღის უორმა არ მახინჯდება, და მაშასადამე, საკუთარ რყევებს გრაგნილში ადგილი არა აქვს.

გ) ნეიტრალის დამიწება იმპიდორის საშუალებით. არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის გამოკვლევის დროს ჩვენ ვთვლიდით, რომ მისი ნეიტრალი დამიწებულია. ძაბვის როგორც საწყისი, ასევე საბოლოო განაწილება მხოლოდ იმ შემთხვევაში იქნება სწორი, რომელიც ეცემა



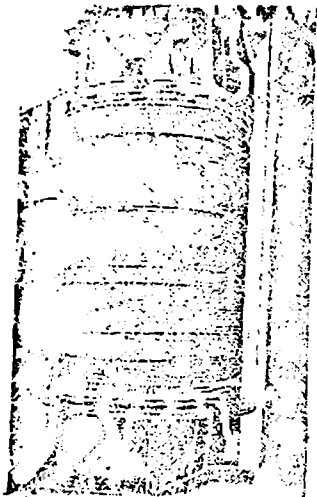
ნახ. 247.



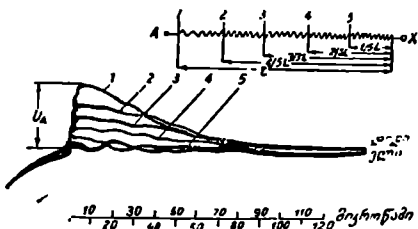
ნახ. 248. GEC ფირმის არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორის გარე ხედი.

ხაზურ ბოლოსთან ძაბვის მნიშვნელობიდან ნულამდე ნეიტრალთან. ტრანსფორმატორში იზოლირებული ნეიტრალით, ძაბვის ასეთივე საწყისი განაწილების უზრუნველსაყოფად, ნეიტრალსა და მიწას შორის ჩაირთვება სპეციალური დამატებითი ტევალობა C , როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 251, ა-ზე.

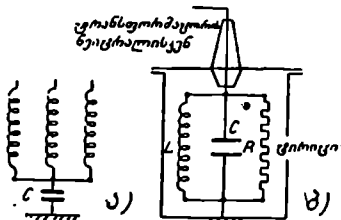
ეს ტევალობა ისეთნაირად გაიანგარიშება, რომ გადაძაბვების დროს გრაგნილში გამავალი მაღალი სიხშირის დენებისათვის, მისი წინააღმდეგობა ახლო იყოს ნულთან და რომ იგი ამიწებდეს ნეიტრალს, ხოლო ნორმალური 50 Hz სიხშირის დროს მისი წინააღმდეგობა იყოს იმდენად დიდი, რომ ნეიტრალი პრაქტიკულად იზოლირებული იყოს.



ნახ. 249. MTJ -ის წარმოების საბჭოთა კონსტრუქციის არამარეზონირებელი ტრანსფორმატორი.



ნახ. 250.

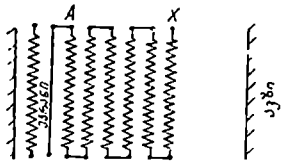


ნახ. 251. იმპიდორის სქემა.

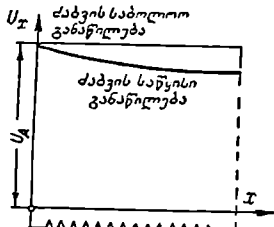
ხშირად მოკლედ შერთვის დენებისაგან დაცვის მიზნით ტრანსფორმატორის ნეიტრალში ჩაირთვება რეაქტიული კოქა. ასეთ შემთხვევაში კოქა და ტევალობა C აიწყობა ერთად, სპეციალურ ზეთის ავზში. გარდა ამისა, გადაძაბვების დროს ნეიტრალზე ძაბვის შესაძლო რყევების ჩაქრობის პროცესის გასაძლიერებლად რეაქტიული კოქის და C ტევალობის პარალელურად ჩაირთვება აქტიური წინააღმდეგობა, ძაბვისაგან დამოკიდებული მახასიათებლით (ტირიტი). ასეთი აპარატი, რომელიც შედგება პარალელურად ჩართული ინდუქტიობისა, ტევალობისა და აქტიურ წინააღმდეგობისაგან, და რომელიც განკუთვნილია ტრანსფორმატორის ნეიტრალში ჩართვისათვის, ატარებს იმპიდორის სახელწოდებას. ნახ. 251, ბ-ზე ნაჩვენებია იმპიდორის სქემა.

ბ) მეხმდგარად ტრანსფორმატორი. შესაძლებელია ტრანსფორმატორის ისეთი კონსტრუქცია, რომლის დროს გრაგნილის მიწის მიმართ ტევალობის

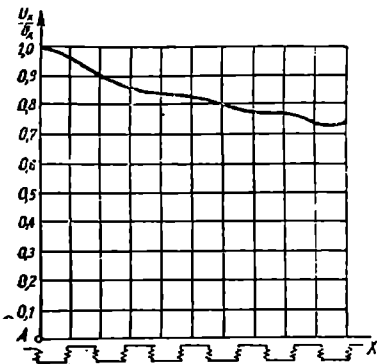
გაელენა დაყვანილი იქნება მინიმუმამდე. ამ შემთხვევაში იზოლირებული ნეიტრალის დროს ძაბვის საწყისი განაწილება პრაქტიკულად მცირედ იქნება განსხვავებული საბოლოო განაწილებისაგან (ნახ. 235). ამ მოთხოვნებებს აკმაყოფილებს ტრანსფორმატორი მრავალფენიანი ცილინდრული გრაგნილით, რომელიც სქემატურად გამოსახულია ნახ. 252-ზე. ფენებს შორის ტევადობა, ბევრჯერ აქარბებს ფენების მიწის მიმართ ტევადობას. ამიტომ α კოეფიციენტი აქ ძლიერ მცირეა, და საწყისი განაწილება მცირედ განსხვავდება საბოლოოსაგან (ნახ. 253). ასეთ ტრანსფორმატორში სიკუთარი რყე-



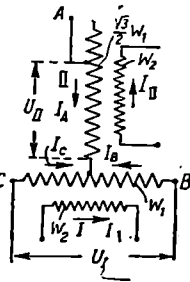
ნახ. 252. მუხმდგრადი ტრანსფორმატორის სქემა.



ნახ. 253. ძაბვის საწყისი განაწილება მუხმდგრად ტრანსფორმატორში გრაგნილის ბოლოს დამიწების შემთხვევაში.



ნახ. 254. მუხმდგრად ტრანსფორმატორში ძაბვის საწყისი განაწილების ცდით მიღებული მახასიათებელი.



ნახ. 255. სკოტის სქემა.

ვები ძალზე უმნიშვნელოა და ამით იგი დაცულია ქვეა-ქუხილის დაცლებთან დაკავშირებულ, საშიშ შინაგან გადაძაბვებისაგან. ამის შესაბამისად შას უწოდებენ მეხმდგრადს.

კონსტრუქციის ერთგვარ გამართლებელ მომენტს წარმოადგენს მრავალფენიანი გრაგნილის საიმედო მექანიკური გამაგრების სიმძლევე. ასეთი კონსტრუქცია უმთავრესად გამოიყენება შედარებით მცირე სიმძლავრის ტრანსფორმატორებში, სადაც შესაძლო მექანიკური ძალები გრაგნილში, შედარებით მცირეა.

ნახ. 252-ზე წარმოდგენილ მეხმდგრად ტრანსფორმატორში შემტანი განხორციელებულია გრაგნილის შიგა მხრიდან, როპელიც ლითონის ეკრანით დაშორებულია ლეროდან. ეკრანი იმავე როლს ასრულებს, რასაც ტვეადური რგოლი. ამასთან ერთად იგი თავიდან გვაშორებს გრაგნილს ლეროს მიმართ ტვეადობას, რომელიც მნიშვნელოვნად მეტია ავზის მიმართ ტვეადობაზე.

ნახ. 254-ზე ნაჩვენებია მეხმდგრად ტრანსფორმატორში ძაბვის საწყისი განაწილების ცდით მიღებული მახასიათებელი; გრაგნილის იზოლირებული ბოლოს შემთხვევაში.

20. ხავეციალური ტრანსფორმატორები

ზემოთ, უმთავრესად განხილული იყო ძალოვანი ნორმალური ტრანსფორმატორები, რომლებიც ემსახურებიან ელექტრული ენერგიის გადაცემასა და განაწილებას. გარდა ამისა, არსებობს სპეციალური დანიშნულების ტრანსფორმატორების სხვადასხვაგვარი ტიპები. ზოგიერთ მათგანს (მაგალითად დამატებით ტრანსფორმატორს და ძაბვის რეგულატორს) ჩვენ ვავეყანით გზადაგზა თეორიის ცალკეულ საკითხების განხილვის დროს. დანარჩენი უველაზე უფრო გაერცელებული ტიპები განხილული იქნება წინამდებარე თავში.

ა) სამფაზა დენის ტრანსფორმირება ორფაზად. ხანდახან რკალურ ელექტროღუმელებში გამოიყენება ორფაზა დენი. ამიტომ, პრაქტიკული მნიშვნელობა ენიჭება სამფაზა დენის ორფაზად გარდაქმნის ამოცანას. ასეთი გარდაქმნა შეიძლება განხორციელებულ იქნეს ტრანსფორმატორების საშუალებით. არსებობს სამფაზა დენის ორფაზად ტრანსფორმირების რამდენიმე სქემა. ყველაზე მეტი პრაქტიკული გამოყენება აქვს სკოტის სქემას, რომელსაც ქვემოთ განვიხილავთ.

სკოტის სქემა შედგება ორი ერთფაზა I და II ტრანსფორმატორისაგან, რომლებიც პირველადი გრაგნილებით ჩაირთება სამფაზა ქსელში ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 255-ზე. II ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის თავისუფალი ბოლო მიუერთდება I ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის შუა წერტილს. ნახ. 256-ზე მოცემულ ძაბვების დიაგრამის თანახმად II ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ძაბვა $U_{II} = OA$ ტო-

ლია $\frac{\sqrt{3}}{2} U_I$, სადაც $U_I = CB - I$ ტრანსფორმატორის გრაგნილის ძაბვაა,

და ამ ძაბვის მიმართ დაძრულია 90° -ით, ამის შესაბამისად. მეორადი ძაბვებიც ერთმანეთის მიმართ დაძრული იქნება 90° -ით.

უფრო მოსახერხებელი რეზერვის შესაქმნელად, ორივე ტრანსფორმატორი კეთდება ერთნაირი, ამასთან მათ პირველად გრაგნილს აქვს განშტო-

ება $\frac{\sqrt{3}}{2} a$ ხვევებიდან ამ განშტოების II ტრანსფორმატორის პირველადი

გრაგნილის ბოლოდ გამოყენებისათვის. ასეთ პირობებში ორივე ტრანსფორმატორის მეორადი ძაბვები მიიღება ტოლი.

ნახ. 255-ის შესაბამისად აღწერილობით პირველადი დენები j_A და j_B , ... C თი, ხოლო მეორადი დენები $-j_I$ და j_{II} -ით, მაშინ ნახ. 255-ის თანახმად შეგვიძლია დავწეროთ შემდეგი განტოლებები:

$$j_A + j_B + j_C = 0; \quad (20,1)$$

$$j_B \frac{w_1}{2} - j_C \frac{w_1}{2} + j_I w_2 = 0; \quad (20,2)$$

$$j_A \frac{\sqrt{3}}{2} w_1 + j_{II} w_2 = 0. \quad (20,3)$$

ამ განტოლების ერთობლივი გადაწყვეტით მივიღებთ:

$$\left. \begin{aligned} j_A &= -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{w_2}{w_1} j_{II}; \\ j_B &= -\frac{w_2}{w_1} j_I + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{w_2}{w_1} j_{II}; \\ j_C &= \frac{w_2}{w_1} j_I + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{w_2}{w_1} j_{II}. \end{aligned} \right\} \quad (20,4)$$

სიმეტრიული ორფაზა დატვირთვის დროს მეორადი დენები ერთმანეთის ტოლია და ურთიერთშორის დაძრულია 90° -ით

$$j_{II} = j_I. \quad (20,5)$$

(20,4) და (20,5)-დან ვღებულობთ

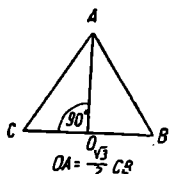
$$\left. \begin{aligned} j_A &= -\frac{w_2}{w_1} \frac{2}{\sqrt{3}} j_{II}; \\ j_B &= \frac{w_2}{w_1} j_{II} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + j \right); \\ j_C &= \frac{w_2}{w_1} j_{II} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - j \right). \end{aligned} \right\} \quad (20,6)$$

ნახ. 257-ზე, (20,6) ტოლობების მიხედვით აგებულია დენების ვექტორული დიაგრამა. აგების დროს სიმარტივისათვის მიღებულია, რომ $w_1 = w_2$. ამ დიაგრამიდან გამომდინარეობს, რომ მეორადი მზრიდან სიმეტრიული ორფაზა დატვირთვის დროს პირველადი დენები ქმნიან სიმეტრიულ სამფაზა სისტემას.

ბ) ტრანსფორმატორები ელექტროლუმენებისათვის. ელექტროლუმენებისათვის განკუთვნილი ტრანსფორმატორების თავისებურებას შეადგენს ის, რომ ისინი აიგება დიდი დენებისათვის, რომლებიც აღწევს ათეულ და ასეულ ათას ამპერსაც კი, ძალზე დაბალი მეორადი ძაბვის დროს; რომელიც

ზოგჯერ ათეულ ვოლტს არ აღემატება. ამით განისაზღვრება ასეთი ტრანსფორმატორების კონსტრუქცია.

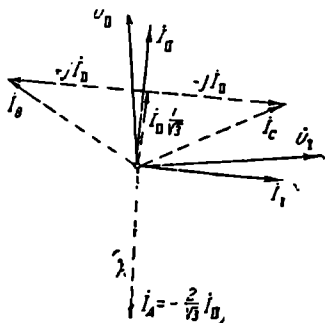
ელექტროლუმენებისათვის განკუთვნილი ტრანსფორმატორების გრაფიკები ჩვეულებრივად სრულდება დისკოსებური მონაცვლე კოქების სახით,



ნახ. 256.



ნახ. 258. ღუმელის ტრანსფორმატორის სარინების განლაგება.



ნახ. 257.

რომლებიც მეორადი მხრიდან შეერთდება პარალელურად ან მიმდევრობით—პარალელურად, ხოლო პირველადი მხრიდან—მიმდევრობით. ხვევების რიცხვზე მეორად მხარეზე ძალზე მცირეა და ხშირად შეადგენს მხოლოდ ერთ-ორ ხვევს. მაგრამ მეორადი ხვევების ჯამური კვეთი აღწევს ასეულ კვადრატულ სანტიმეტრს.

ჩვეულებრივი ძალოვანი ტრანსფორმატორებისაგან განსხვავებით, ტრანსფორმატორებში ელექტროლუმენებისათვის ჩვეულებრივად მოითხოვება ძაბვის რეგულირება ფართო ზღვრებში, რომელიც აღწევს $\pm 50\%$. ასეთ ტრანსფორმატორში რეგულირება შესაძლოა, როგორც პირველადი, ასევე მეორადი მხრიდან. მეორადი მხრიდან რეგულირება ხორციელდება ხვევების პარალელურიდან, შერეულზე ან მიმდევრობით შეერთებაზე გადართვით რეგულირება პირველადი მხრიდან წარმოებს ჩვეულებრივი წესით, ჩართული ხვევების რაოდენობის შეცვლის გზით. ხშირად ამ ხერხთან ერთდროულად ახდენენ გრაგნილის ვარსკვლავიდან სამკუთხედზე გადართვასაც. ელექტროლუმენებისათვის განკუთვნილი ტრანსფორმატორის სარინები მეორადი მხრიდან სრულდება სპილენძის მასიური სალტეების სახით. იმის გამო, რომ მეორადი გრაგნილი შედგება მცირე რიცხვი, დიდი კვეთის ხვევებისაგან, სარინებში ძაბვის აქტიური და რეაქტიული ვარდნა სავსებით თანაზომადია ძაბვის ვარდნისა გრაგნილში. სარინები და გამომყვანები საღუმელო ტრანსფორმატორებში განლაგდება იმგვარად, რომ მათი ინდუქტივობა იყოს უმცირესი (ნახ. 258). ნახ. 259-ზე ნაჩვენებია მოსკოვის სატრანსფორმატორო ქარხნის სამუშაო, ელექტრო-საღუმელო ტრანსფორმატორი (უაფხოთ).

ელექტროსაღუმელო ტრანსფორმატორები ხშირად მუშაობენ მძიმე პირობებში, მკვეთრად ცვლადი დატვირთვის შემთხვევაში, რომელიც იცვლება

ზღვრებში, უქმი სვლიდან მოკლედ ჩართვამდე. ამიტომ ასეთ ტრანსფორმატორში მექანიკური გამაგრება განსაკუთრებით საინტერესოა უნდა იყოს, რათა გაუძლოს მოკლედ შერთვის დროს წარმოშობილ მრავალჯერად ძალებებს. ხშირად მოკლედ შერთვის დენის შესაზღუდავად პირველად წრედში რთავენ დამატებით რეაქტიულ კოქსს.

გ) ტრანსფორმატორები რაკალური ელექტროშედულებისათვის. რაკალური ელექტროშედულებისათვის განკუთვნილი ტრანსფორმატორის დანიშნულებას წარმოადგენს ქსელის ძაბვის დაწვევა, რაკალის ანთების ძაბვამდე, რომელიც ჩვეულებრივ იმყოფება ზღვრებში $40 \pm 70\%$. შემდუღებელი ტრანსფორმატორის მუშაობისათვის დამახასიათებელია განმეორებით-წყვეტადი მუშაობის რეჟიმი, მკვეთრი გადასვლებით უქმი სვლიდან მოკლედ შერთვაზე და პირიქით.



ნახ. 259. MT3-ის წარმოების სამუხაზ ელექტროდუღმლის ტრანსფორმატორი. ხაზური დენი 40 000 A.

იმისათვის, რომ რაკალი მდგრადად და უწყვეტად ენთოს, საჭიროა, ჯერ ერთი, რომ გარეწრედის წინააღმდეგობის რყევის დროს დენი იცვლებოდეს უმნიშვნელოდ, ე. ი. აუცილებელია დენის წყაროს მკვეთრად მვარდნი გარე მახასიათებელი; მეორე ის, რომ შემდუღებულ წრედში გეჟონდეს მნიშვნელოვანი ფაზათა ძერა დენსა და ე. მ. ძ. შორის ($\cos \varphi = 0,4 \pm 0,5$) ამისათვის ტრანსფორმატორს, რომელიც კვებას ელექტროშემდუღებელ აპარატს, უნდა ქონდეს დიდი ინდუქტივობა. შემდუღებელი ტრანსფორმატორის დიდი ინდუქტივობა საჭიროა მოკლედ შერთვის დენის შეზღუდვისათვისაც. ჩვეულებრივად შემდუღებელი ტრანსფორმატორის მოკლედ შერთვის დენი არ უნდა აღემატებოდეს ორჯერად ნომინალურ მნიშვნელობას. ამიტომ გვიხდება შემდუღებელი ტრანსფორმატორების ინდუქტიური წინააღმდეგობის ხელოვნურად გაზრდა.

შემდუღებელი ტრანსფორმატორების არსებული მრავალრიცხოვანი კონსტრუქციები, ინდუქტიური წინააღმდეგობის გაზრდის ხერხის მიხედვით შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად:

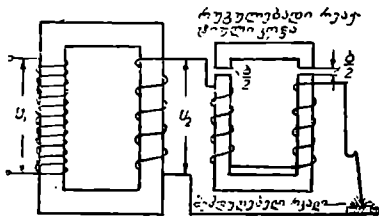
1. ტრანსფორმატორები გაზრდილი მაგნიტური ფანტეით. ამ ჯგუფს მიეკუთვნება ტრანსფორმატორები გრაგნილების სხვადასხვა ღეროებზე განლაგებით, ტრანსფორმატორები გრაგნილების მიმდევრობითი-განლაგებით ღეროს გასწვრივ, ტრანსფორმატორები მაგნიტური შუნტებით-ფანტეის არეს გაზრდისათვის და ა. შ.

2. ტრანსფორმატორები მიმდევრობით ჩართული რეაქტიული კოქით. შემდუღებელ ტრანსფორმატორებში ჩვეულებრივად გათ-

ვალისწინებულია შემდგომეული დენის რეგულირების შესაძლებლობა ელექტროდის დიამეტრის შესაბამისად. რეგულირების ყველაზე უფრო მარტივ საშუალებებს წარმოადგენს ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის შეცვლა, ან ხვევთა რიცხვის შეცვლა დამატებით რეაქტიულ კოქაში. გამოიყენება აგრეთვე რეგულირება, ტრანსფორმატორის დამატებითი რეაქტიული კოქის, ან მაგნიტური სისტემის ცალკეული ნაწილების მაგნიტური წინააღმდეგობის შეცვლით.

ნახ. 260-ზე ნაჩვენებია შექმნილი ტრანსფორმატორის სქემა დამატებითი რეაქტიული კოქათი. ამ სქემაში შემდგომეული დენის რეგულირებას ვაღწევთ დამატებითი კოქას მაგნიტურ წრედში δ საპიერო შუალედის შეცვლით.

ღ) სიხშირის გამსაზღვრელი. მრეწველობაში ხშირად გვხვდება 50 Hz-ზე უფრო მაღალი სიხშირის, კერძოდ გასაშვებული სიხშირის ძაბვის აუცილებლობა.



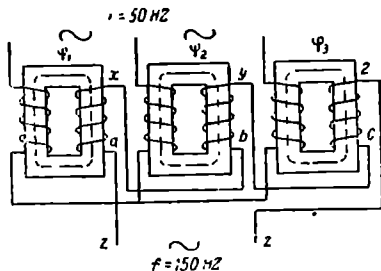
ნახ. 260. დამატებითი რეაქტიულკოქიანი შემდგომეული ტრანსფორმატორის სქემა.

გასაშვებული სიხშირის ძაბვა გამოიყენება მაგალითად, ინდუქციურ ღუმელებში, რომელთა ეკონომიურობა იზრდება სიხშირის ზრდასთან ერთად; ცვლადი დენის მაღალსიხშირიანი ძრავების კვებისათვის; იგი გამოიყენება აგრეთვე დანადგარებში ცვლადი დენის გამართვისათვის და ა. შ. ვინაიდან ელექტრული ენერჯიის გენერირება ხდება სტანდარტული 50 Hz სიხშირის დროს, ამიტომ წამოიკრება 50 Hz ძაბვის 150 Hz ძაბვად გარდაქმნის ამოცანა.

ასეთი გარდაქმნა შესაძლებელია განსაკუთრებული ტიპის ტრანსფორმატორის საშუალებით, რომელსაც სიხშირის გამსაზღვრელი ეწოდება.

სიხშირის გამსაზღვრლის მუშაობა

დამყარებულია ე. მ. ძ-ის მრუდში შესამე პარამონიკის გამოყოფის პრინციპზე. ნახ. 261-ზე ნაჩვენებია გამსაზღვრლის ერთ-ერთი პრინციპიალური სქემა. გამსაზღვრელი შედგება სამი ერთფაზა ტრანსფორმატორისაგან, რომელთა პირველადი გრაგნილები შეერთებულია ვარსკვლავად, ხოლო მეორადი — ლია სამკუთხედად. ამ შემთხვევაში, როგორც ნაჩვენებია იყო II ნაწილში § 10, φ_1 , φ_2 და φ_3 მაგნიტურ ნაკადებში და ფაზურ ე. მ. ძ-ში წარმოიშვება შესამე პარამონიკები. მეორადი გრაგნილის სამ მიმდევრობით შეერთებულ ფაზაში ძირითადი სიხშირის ე. მ. ძ-ების ჯამი უდრის ნულს. ამიტომ ძირითადი სიხშირის ძაბვა $a-z$ მომჭერებზე ტოლია ნულის; შესამე პარამონიკის



ნახ. 261. სიხშირის გასაშვების პრინციპული სქემა.

ე. მ. დ. სამ ფაზაში ჯამდება არითმეტიკულად. ამიტომ a — გ მოქმედებზე იმოქმედებს მესამე ჰარმონიკის სამმაგი ფაზური ძაბვა (გასამბეული სიხშირის).

უმაღლესი ჰარმონიკების ელექტრომაგნიტური ძალები დამოკიდებულია გულანის გაყენების ხარისხზე. ამიტომ მაგნიტური ინდუქცია სიხშირის გამსამბებელში აიღება $17000 \div 18000$ Gs-ის ტოლი, ჩვეულებრივ ტრანსფორმატორში მიღებულ $14000 \div 15000$ Gs-ის ნაცვლად. ამ პირობებში მესამე ჰარმონიკის ფაზური ე. მ. დ.ის ამპლიტუდა აღწევს ძირითადი ჰარმონიკის $30 \div 35\%$; ასე რომ გასამბებული სიხშირის ძაბვა აღწევს მნიშვნელობას, რომელიც ახლოა ძირითადი ჰარმონიკის ძაბვასთან.

ე) კასკადური სქემები. მაღალი ძაბვის ლაბორატორიულ დანადგარებში სხვადასხვა საინჟინერიო კონსტრუქციების გამოსაკვლევად გვხვდება მილიონვოლტის რიგის, ძალიან მაღალი ძაბვების აუცილებლობა. ასეთი ძაბვების მისაღებად გამოიყენება სპეციალური საგამოცდო ტრანსფორმატორები.

მაღალი ძაბვების მიღება ერთ ტრანსფორმატორში წარმოადგენს ძალზე რთულ ამოცანას. ამიტომ ასეთი ტრანსფორმატორები ხშირად სრულდება ტრანსფორმატორების კასკადის სახით. კასკადის იდეა მდგომარეობს რამდენამე ტრანსფორმატორის მიმდევრობით შეერთებაში, რომელთა ძაბვები ჯამდება და გვაძლევს კასკადის საერთო ძაბვას.

შეერთების კასკადური სქემები გამოყენებას პოულობენ ელექტროტექნიკის სხვა დარგებშიც. მაგალითად, მაღალი ძაბვის ელექტრული გაზომვების ტექნიკაში (ძაბვის ტრანსფორმატორები). ძალიან ტრანსფორმატორებისათვის კასკადურმა შეერთებამ მისი ზოგიერთი არახელსაყრელი თავისებურების გამო, აქამდე ვერ ჰპოვა პრაქტიკული გამოყენება.

ნახ. 262-ზე ნაჩვენებია ტრანსფორმატორების სამ ელემენტისაგან შემდგარი კასკადის სქემა. ამ სქემიდან ჩანს, რომ ყოველი მომდევნო ელემენტის ავზი უნდა იქნეს მიწიდან განზოლოებული ყველა წინა ელემენტების ჯამურ ძაბვაზე.

იმისათვის, რომ ასეთმა კასკადმა იმოშაოს, ყოველ ელემენტს (ბოლო ელემენტის გარდა) ორი ჩვეულებრივი გრაგნილის გარდა უნდა ქონდეს მესამეც, ეგრეთწოდებული ამგზნები გრაგნილი (ნახ. 262-ზე გრაგნილი 3), რომლის დანიშნულებაა — ყვებოს მომდევნო ელემენტის პირველადი გრაგნილი.

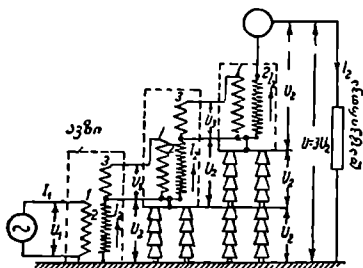
ამგზნები გრაგნილის არსებობა არსებითად მოქმედებს კასკადის პარამეტრებზე და მახასიათებლებზე.

მთელი კასკადის მეორადი სიმძლავრე ტოლია $3U_2I_2 = U_1I_1$; ამავე სიმძლავრეზე უნდა იქნეს გათვლილი გენერატორიდან პირველი ტრანსფორმატორი. ამ სიმძლავრის U_1I_2 -ის ტოლი ნაწილი, პირველი ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილით გადაეცემა უშუალოდ დატვირთვას, ხოლო მეორე ნაწილი $2U_2I_2$ ამგზნები გრაგნილის საშუალებით მეორე ტრანსფორმატორს. რომლის სიმძლავრე უდრის $2U_2I_2$. მეორე ტრანსფორმატორი ამ სიმძლავრის ნახევარს (U_2I_2) თავისი მეორადი გრაგნილის საშუალებით გადასცემს დატვირთვას, ხოლო მეორე ნახევარს — ამგზნები გრაგნილის საშუალებით მესამე ტრანსფორმატორს, რომლის სიმძლავრე ტოლია U_2I_2 . ამგვარად, კასკადის

ქალკეულ ელემენტების სიმძლავრეების ჯამი, ორჯერ მეტია მის სასარგებლო სიმძლავრეზე.

$$\left(\text{მართლაც, } \frac{3U_2 I_2 + 2U_1 I_2 + U_2 I_2}{3U_1 I_2} = 2 \right).$$

ზოგად შემთხვევაში კასკადის n საფეხურისათვის ეს ფარდობა ტოლი აქნება $\frac{1+n}{2}$. საგამოცლო, გამზომ და სხვა სპეციალურ ტრანსფორმატორებისათვის, რომელთა სიმძლავრე შედარებით მცირეა, ამას არა აქვს გადამწყვეტი მნიშვნელობა. ძალოვან ტრანსფორმატორებისათვის კი დადგმულ ტრანსფორმატორული სიმძლავრის ასეთი ზრდა მნიშვნელოვნად აძვირებს დანადგარს და ამცირებს მ. ქ. კ-ს. დიდი მნიშვნელობა აქვს აგრეთვე იმ გარემოებას, რომ კასკადის ელემენტების სხვადასხვა სიმძლავრის გამო, მათ აქვთ სხვადასხვა მოკლედ შერთვის დაბეა, ამასთან მოკლედ შერთვის სრული დაბეა შეკეთრად იზრდება ელემენტების რაოდენობის ზრდასთან ერთად.



ნახ. 262. ტრანსფორმატორების სამეულმენტიანი კასკადის სქემა.

ეს წარმოადგენს კასკადის ელემენტების რაოდენობის ძირითად შემზღულად მიზეზს. უფრო ხშირად, კასკადი შესდგება ორი ელემენტისაგან, იშვიათად—სამისაგან. მოკლედ შერთვის დაბეის შეზღუდვა ოთხი ელემენტისაგან შემდგარ კასკადში, წარმოადგენს უკვე სერიოზულ სიძნელეს.

21. თანამდროვე ტრანსფორმატორების დახასიათება და მათი უმჯობესი მანვითარების პრისკმბივები

ა) ს. ს. რ. კავშირში ტრანსფორმატორთმშენებლობის მოკლე დახასიათება. საბჭოთა ტრანსფორმატორთმშენებლობა წარმოადგენს საბჭოთა ხელისუფლების დროს ელექტრომრეწველობის ხელახლა შექმნილ დარგს.

ძალოვანი ტრანსფორმატორების წარმოება უკანასკნელ დრომდე კონცენტრირებული იყო კუბიშევის სახ. მოსკოვის სატრანსფორმატორო ქარხანაში. ამჟამად, ტრანსფორმატორებზე სოციალისტური მეურნეობის მოთხოვნილების სწრაფად ზრდასთან დაკავშირებით სსრ კავშირის აღმოსავლეთ რაიონებში შენდება ახალი სატრანსფორმატორო ქარხნები.

ძალოვანი ზეითანი ტრანსფორმატორების მახასიათებლები წესდება OCT 2524.¹

ქვემოთ მოყვანილია ძალოვანი ტრანსფორმატორების ზოგიერთი სტან-

¹ ამჟამად OCT 2524 გადამუშავებულია ზოგიერთ მის ნაწილში.

ხაშვანა ორგანოლიანი ტრანსფორმატორების მახასიათებლები

ნომინალური სიმძლავრე	გრაგნილების ნომინალური ძაბვის ზედა ზღვარი		დანაკარგები		ნომინალური სიმძლავრე	გრაგნილების ნომინალური ძაბვის ზედა ზღვარი		დანაკარგები	
	მძ	დძ	უქმი სელის, ნომინალური ძაბვის დროს	მოკლედ შერთვის, ნომინალური დატვირთვის დროს		მძ	დძ	უქმი სელის, ნომინალური ძაბვის დროს	მოკლედ შერთვის ნომინალური დატვირთვის დროს
5	6,3	0,4	0,06	0,185	1 800	10	6,3	8	24
10	10	0,4	0,14	0,335		35	10,5	8,3	24
20	10	0,4	0,22	0,6	2 400	10	6,3	9,2	31,5
30	10	0,4	0,3	0,85		35	10,5	10	31,5
50	10	0,4	0,44	1,325	3 200	10	6,3	11	37
	35	0,4	0,54	1,325		38,5	10,5	11,5	37
75	10	0,4	0,59	1,875	4 200	121	38,5	16,6	39,5
100	10	0,525	0,73	2,4		10	6,3	14	47
	35	0,525	0,9	2,4	35	10,5	14,5	47	
135	10	0,525	1	3,15	5 600	10	6,3	18	56
180	10	3,15	1,5	4,1		38,5	10,5	18,5	57
	35	10,5	1,5	4,1	121	38,5	25,5	62,5	
240	10	0,525	1,6	5,1	7 500	38,5	10,5	24	75
320	10	3,15	2,3	6,2		121	38,5	33	77
	35	10,5	2,3	6,2	38,5	10,5	29	92	
420	10	0,525	2,3	7,7	10 000	121	38,5	38,5	97,5
	10	6,3	3,3	9,4		38,5	10,5	39	122
560	35	10,5	3,35	9,4	15 000	121	38,5	50	133
	10	0,525	4,1	11,9		38,5	10,5	48	148
750	10	6,3	4,9	15	20 000	121	38,5	60	163
	35	10,5	5,1	15		38,5	10,5	73	180
1000	10	6,3	6	19,5	31 500	121	38,5	86	200
	35	10,5	6,5	19,5					

დართული მახასიათებლები. ცხრილის მონაცემები განლაგებულია მზარდა, სტანდარტული სიმძლავრეების სკალის მიხედვით.

სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ნომინალური ძაბვის ზემო ზღვარია მ. ძ. გრაგნილისათვის—121 kV, ხმ—38,5 kV და ღმ გრაგნილისათვის—11 kV.

სამგრაგნილიან ტრანსფორმატორში მ. ძ. გრაგნილის სიმძლავრე ყოველთვის ტრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრის ტოლია. ორი დანარჩენი გრაგნილიდან, თვითთვის სიმძლავრე შეიძლება ტოლი იყოს. ან

ცხრილი 14

ერთჯაზა ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორების მახასიათებლები

ნომინალური სიმძლავრე	გრაგნილების ნომინალური ძაბვის ზედა ზღვარი		დანაკარგები		ნომინალური სიმძლავრე	გრაგნილების ნომინალური ძაბვის ზედა ზღვარი		დანაკარგები	
	მძ	ღმ	უქმი სელის ნომინალური ძაბვის დროს	მოკლედ შერთვის, ნომინალური დატვირთვის დროს		მძ	ღმ	უქმი სელის, ნომინალური ძაბვის დროს	მოკლედ შერთვის, ნომინალური დატვირთვის დროს
600	35	10,5	3,2	9,5	13 500	121	38,5	33,5	98,5
1 067	35	10,5	5	14,5	20 000	121	38,5	47	129
1 867	35	10,5	7,3	22	30 000	121	10,5	66	172
3 333	38,5	10,5	10,6	32,8	40 000	121	15,75	84	216
5 000	38,5	10,5	14	45	შენიშვნა: 600, 1067, 3333 და 5000 kVA სიმძლავრის ტრანსფორმატორები, მზადდება მხოლოდ ტრანში დამუშავებისათვის და მიტანის მხრივ განსაკუთრებით მძიმე პირობებში მყარადგილებსათვის.				
	110	11	18	47					
6 667	38,5	10,5	17	53,5					
	121	38,5	24	56					
10 500	38,5	10,5	23,5	77					
	121	38,5	29,5	81,5					

ცხრილი 15

სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორების სიმძლავრეების სკალა

სამუჯაზა ტრანსფორმატორები	kVA	5 600	7 500	10 000	15 000	20 000	31 500
ერთჯაზა ტრანსფორმატორები		5 000	6 667	10 500	13 500	20 000	40 000

ტრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრის, ან ნომინალური სიმძლავრის 67%-ის.

სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის გრაგნილები ღეროზე განლაგდება კონცენტრულად. მძ გრაგნილი ყოველთვის გარე გრაგნილია. დანარჩენი ორი გრაგნილიდან თითოეული შეიძლება იყოს შიგა (ღეროდან პირველი) ან შუა. ამის მიხედვით მძ—სძ და მძ—დძ გრაგნილების მოკლედ შერთვის დაბვა შეიძლება 10,5 ან 17% ტოლი იყოს. სძ—დძ გრაგნილების მოკლედ შერთვის დაბვა ყველა შემთხვევაში ტოლია 6"

ცხრილი 16

ნომინალური დაბვების მოქმედი სკალა

დამწვევი ტრანსფორმატორები	მძ. გრაგნილის ნომინალური დაბვები (kV)	დძ. გრაგნილის ნომინალური დაბვები (kV)
ამწვევი ტრანსფორმატორები	0,38; 0,5; 3; 6; 6,3; 10; 10,5; 15,75; 35; 110; 220;	0,133; 0,23; 0,4; 0,525; 3,15; 3,3; 6,3; 6,6; 10,5; 11; 38,5; 121
ამწვევი ტრანსფორმატორები	38,5; 121; 242	3,15; 6,3; 10,5

მოცემულ სიმძლავრისათვის დაბვების შესაძლო შეწყვილებათა რაოდენობა, დაბვების დადგენილ ზეჰო ზღერის შემთხვევაში (ცხრილი 13 და 14) განისაზღვრება მოსკოვის კუიბიშევის საბ. სატრანსფორმატორო ქარხნის პროდუქციის მოქმედი ნომენკლატურით. პროდუქციის ამავე ნომენკლატურით განისაზღვრება იმ ტრანსფორმატორების ძირითადი პარამეტრებიც, რომლებსათვისაც უჯრ კიდევ არ არსებობს სტანდარტი. ასეთ ტრანსფორმატორებს მიეკუთვნება მოსკოვის სატრანსფორმატორო ქარხნის წარმოების ტრანსფორმატორები ელექტროლუმენებისათვის, ტრანსფორმატორები დაბვის რეგულირებისათვის და ტვირთის ქვეშ, მშრალი ტრანსფორმატორები ავტო-ბლოკირებისათვის და ტრანსფორმატორების სხვა ტიპები.

ჩვეულებრივი ძალოვანი ტრანსფორმატორების გარდა არსებობს სტანდარტები ზოგერთი ტიპის ტრანსფორმატორებისათვისაც როგორცაა: გამ-შვები ავტოტრანსფორმატორები მალალოლტიან სინქრონულ და ასინქრონულ ძრავებისათვის, ტრანსფორმატორები ვერცხლისწყლის გამართველებისათვის, დაბვის ტრანსფორმატორები, დენის ტრანსფორმატორები, აფეთქებისაგან დაცული (მალაროს) ტრანსფორმატორები, მშრალი შემდუღებელი ტრანსფორმატორები. დენის ტრანსფორმატორები მზადდება ლენინგრადის ქარხანა „ელექტროაპარატი“, შემდუღებელი ტრანსფორმატორები ლენინგრადის ქარხანა „ელექტრიკში“. სპეციალური ტრანსფორმატორების დანარჩენ ჩამოთვლილ ტიპებს უშვებს მოსკოვის სატრანსფორმატორო ქარხანა.

ბ) თანამედროვე ტრანსფორმატორების კუთვნილი ნაწილები და არმატურა. II ნაწილში § 9, 18 და 19 მოცემული იყო თანამედროვე ტრანსფორმატორების კონსტრუქციების აღწერილობა. იქვე აღწერილი იყო ტრანსფორმატორების ზოგიერთი კუთვნილი ნაწილები, როგორცაა მაგალითად, სარინები, გადამრთველი მოწყობილობები. სხვა კუთვნილი ნაწილები და კონსტრუქციული დეტალები აღწერილი იქნება ქვემოთ.

თანამედროვე ტრანსფორმატორის ტიპური კუთვნილი ნაწილები და არმატურა ნაჩვენებია ნახ. 263-ზე.

1. გამსვლელი იზოლატორები. ტრანსფორმატორის გრავნილები ხაზს მიუერთდება იზოლატორების (გამომყვანების) საშუალებით (ნახ. 264), რომლებიც გადიან ხუფში ან ავზის კედელში. გამსვლელი იზოლატორი წარმოადგენს დენგამტარ ლეროს, რომელიც სათანადოთაა განმზოლოებული დამიწებული ხუფისგან ან ავზის კედლისაგან. იზოლატორის გასვლის ადგილას იქმნება სპეციალური შენეიდროება, რომელიც უზრუნველყოფს მისი დამაგრების ჰერმეტიკულობას.

ძაბვის მიხედვით იზოლატორები ზედადება იყოს მთლიანი (ხანდახან კი ღრუც) ფაიფურის (ნახ. 264, ა); ფაიფურისა, ზეთის შევსებით (ნახ. 264, ბ); ფაიფურისა, კომბინირებული შიგა ზეთბარიერიანი იზოლაციით (ნახ. 264, გ). ფაიფურის წიბოვანი ფორმა, ჩვეულებრივად იხმარება ტრანსფორმატორის ღია პაერაზე დადგმის დროს, და ემსახურება ზედაპირული დაცვის გზის გაგრძელებას.

ხანდახან მაღალი ძაბვის იზოლატორებში ელექტრულ არეს გრადიენტების შემცირების მიზნით ლეროსა და ფაიფურს შორის იზოლაციაში კეთდება ლითონის გამათანასწორებელი შუასადებები (ეკრანები) (ნახ. 264, გ). ამ პრინციპის შემდგომ განვითარებას წარმოადგენს კონდენსატორული ტიპის იზოლატორის მოწყობა, რომელშიც ლითონის შემონაფენების შესაბამისი შერჩევით და განლაგებით უზრუნველყოფილია ელექტრულ არეს გრადიენტების უფრო თანაბარი განაწილება.

2. კონსერვატორი. OCT 2524-ის თანახმად ტრანსფორმატორებს, რომელთა სიმძლავრე 100 kVA-ზე მეტია ან უმაღლესი ძაბვა 6 kV-ზე მეტი, უკეთდება კონსერვატორი (გამათაროებელი).

კონსერვატორი წარმოადგენს ლითონის ცილინდრულ ქურქელს, რომელიც მოთავსებულია ტრანსფორმატორის ხუფზე და უერთდება ავზს ლითონის მილით (ნახ. 263). კონსერვატორი, ერთი მხრივ ამცირებს ზეთის პაერთან შეხების ზედაპირს, რითაც იცავს ზეთს სწრაფად დაჟანგვისაგან, და მეორე მხრივ უზრუნველყოფს ზეთის მოკულობის ცვალებადობის შესაძლებლობას ტემპერატურის რყევის დროს.

კონსერვატორის ტევადობა გაიანგარიშება იმგვარად, რომ მუშაობის ნებისმიერ რეჟიმში და პირობებში ზეთი დარჩეს კონსერვატორის ფარგლებში.

კონსერვატორს აქვს ზეთის მაჩვენებელი მინა ზეთის დონის განსაზღვრისათვის (ნახ. 263).

ტრანსფორმატორებში სიმძლავრით 100 kVA-მდე ან უმაღლესი ძაბვით 6 kV-მდე, ზეთის მაჩვენებელი მინები იდგმება უშუალოდ ავზის კედელზე.

ასეთ ტრანსფორმატორებს ხუფზე სპეციალური საცობი აქვს, რომელიც უზრუნველყოფს ავზში ჰაერის შესვლას და გამოსვლას ზეთის მოცულობის ცვალებადობის დროს.

3. ზეთის ჩამოსაშვები, სინჯის ასაღები, გასაწმენდი, გასაშრობი და ჩასასხმელი მოწყობილობები. ტრანსფორმატორებს 100 kVA-მდე სიმძლავრით, ავზის ხუფზე აქვს საცობი ზეთის ჩასასხმელად, და ჩამოსაშვები საცობი ავზის ქვემოთ ზეთის ჩამოსაშვებად და ასაღებად.

135—420 kVA სიმძლავრის ტრანსფორმატორებს ავზის ხუფზე აქვს ონკანი მილტუჩათი, ზეთის გამწმენდი აპარატის მისაერთებლად და ზეთის ჩასასხმელად; ონკანი მილტუჩათი, ავზის ქვევით, ზეთის გამწმენდი აპარატის მისაერთებლად, სინჯის ასაღებად და ზეთის ჩამოსაშვებად; საცობი ავზის ფსკერზე ტალახის და ზეთის ნარჩენების ჩამოსაშვებად. ზემო და ქვემო ონკანები ჩვეულებრივად დაყენებულია დიაგონალურ ხაზზე, რითაც უზრუნველყოფილია ზეთის უფრო ინტენსიური გაწმენდა.

560 kVA და მეტი სიმძლავრის ტრანსფორმატორებს აქვს კონსერვატორის ავზთან შემაერთებელ მილში საკეტი ვენტილი კონსერვატორის გამოსართავად, ავზის ხუფზე მოთავსებული მილყელი მილტუჩათი და ჩამშობით სავაკუუმო ტუმბოს მისაერთებლად¹; ავზის ხუფზე ონკანი მილტუჩათი ზეთის გამწმენდი აპარატის მისაერთებლად და ზეთის ჩასასხმელად; ონკანი მილტუჩათი ავზის ქვევით, ზეთის გამწმენდი აპარატის მისაერთებლად, სინჯის ასაღებად და ზეთის ჩამოსაშვებად; საცობი ფსკერზე ტალახის და ზეთის ნარჩენების ჩამოსაშვებად.

რადიატორული ტიპის ავზებთან ტრანსფორმატორებში ყოველ რადიატორს აქვს ორი ვენტილი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს გამოვრთოთ რადიატორი, ავზიდან ზეთის ჩამოშვებლად. გარდა ამისა, ყოველ რადიატორს აქვს ორი საცობი: ერთი ქვევით, ზეთის ჩაშვებისათვის და მეორე ზევით, ჰაერის შემოსაშვებად ზეთის ჩამოსხმის დროს.

4. საგორავები. ტრანსფორმატორები 75 kVA-მდე სიმძლავრით სრულდება საგორავების (ჟრიკის) გარეშე.

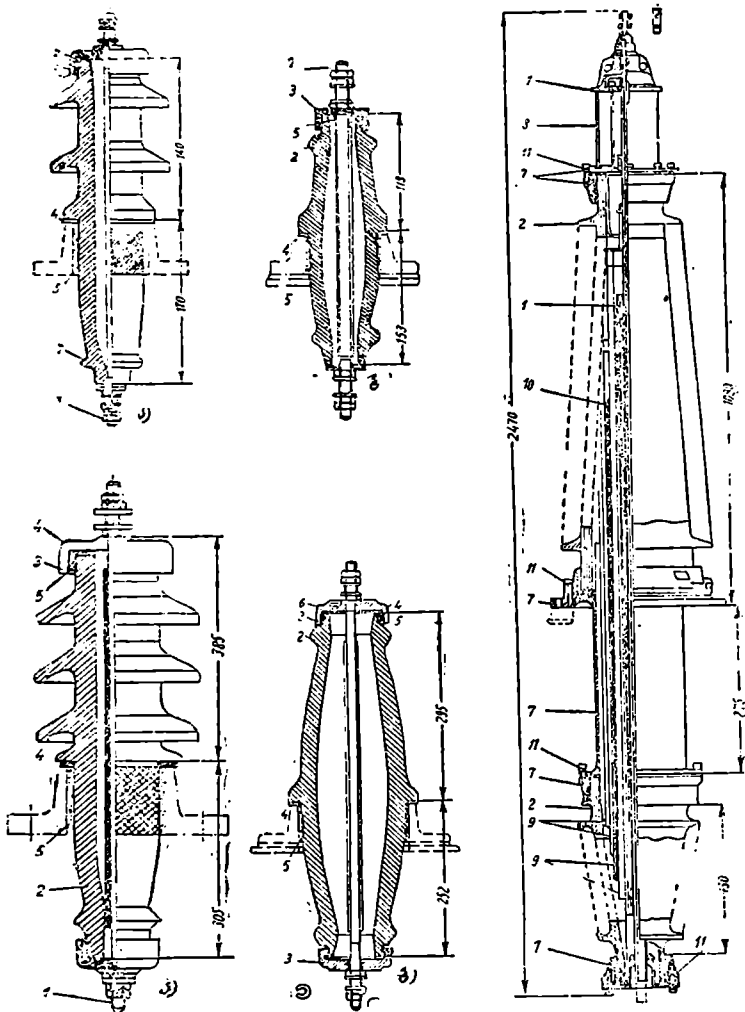
ტრანსფორმატორები 100-დან 1000 kVA-მდე სიმძლავრით, სრულდება გადასადგმელი საგორავებით ტრანსფორმატორის გადასაადგილებლად წინ, როგორც ფართო, ისე ვიწრო გვერდით.

1000 kVA-ზე მეტი სიმძლავრის ტრანსფორმატორებს, როგორც წესი, აქვს საგორავები ფართო გვერდით წინ გადასაადგილებლად.

5. ამწყვეტი მოწყობილობა. სიმძლავრის მიხედვით ტრანსფორმატორის აწვევა ხდება ზეთის ავზის ზემო ჩარჩოთი, როგლებიდან ან კაეებიდან. ყველა ამ შემთხვევაში დასაშვებია ზეთჩასხმული ტრანსფორმატორების აწვევა.

7500 kVA და მეტი სიმძლავრის სამთაზა ტრანსფორმატორების, და 5000 kVA და მეტი სიმძლავრის ერთთაზა ტრანსფორმატორების, ავზის ქვემო ჩარჩო აღქურვილია ნალებით ტრანსფორმატორის დომკრატით ასაწვევად (ნახ. 263).

¹ ტრანსფორმატორის გაშრობის დროს ვაკუუმის შესაქმნელად.



ნახ. 264. იზოლატორების ნორმალური კონსტრუქციები. 1—დენგამტარი ლერო; 2—იზოლატორი; 3—ლითონის ხუფი; 4—მაცემენტირებელი საგოზავი; 5—შემამკიდრობელი შესადები ზეთამძლე რეზინისაგან; 6—საცობი ჰაერის გამოსვლის უზრუნველსაყოფად, იზოლატორის ზეთით შევსების დროს; 7—ჩამოსხმული მილტუჩა; 8—გამაფართოებელი, იზოლატორის ზეთისათვის; 9—საიზოლაციო ცილინდრი; 10—ლითონის ეკრანი, საიზოლაციო შუალედში ელექტრული არეს განაწილების გაუმჯობესებისათვის; 11—რეზინის, შემამკიდრობელი შესადები.

ტრანსფორმატორის ამოსაღები ნაწილის აწვევა ხდება ან უშუალოდ დამწენი კოქებით, ან ტრანსფორმატორის ხუფში გამავალ სარკებზე მიხრახნილი რგოლებით (ხუფიანათ აწვევა), ან სპეციალურ ყურებით (ნახ. 263).

6. დამცავი მოწყობილობა. 1000 kVA და მეტი სიმძლავრის ტრანსფორმატორები აღჭურვილია:

1. ტრანსფორმატორის ხუფზე მოთავსებულია გამოსაბოლქვი მილმემბრანით (ჩვეულებრივად შუშის) (ნახ. 263); მილის დანიშნულებაა გაზების სწრაფი განრინება, რომლებიც შეიძლება წარმოიშვან ტრანსფორმატორის ავარიის დროს.

2. გაზური რელეთი,¹ რომელიც ჩვეულებრივად დაიდგება ავზის კონსერვატორთან შემავრთებელ მილში.

ტრანსფორმატორები 400 V-მდე უმდაბლესი ნომინალური ძაბვით, აღჭურვილია გამრღვევი დამცავით, რომელიც გრაგნილების ვარსკვლავად შეერთების დროს ჩაირთვება გრაგნილის ნეიტრალურ წერტილსა და მიწას შორის, ხოლო სამკუთხედად შეერთების დროს—ერთ-ერთ ფაზასა და მიწას შორის. ეს დამცველი დაამიწებს ღმ გრაგნილს, ავარიის დროს მასში მაღალი ძაბვის წარმოშობის შემთხვევაში.

7. ზეთის ტემპერატურის გამზომი მოწყობილობა. 240 kVA-მდე სიმძლავრის ტრანსფორმატორები აღჭურვება ლეროსებური ტიპის თერმომეტრებით რომლებიც ჩაიხრახნება ტრანსფორმატორის ხუფში. თერმომეტრის დანიშნულებაა—ზეთის ზემო ფენების ტემპერატურის გაზომვა.

320 kVA და მეტი სიმძლავრის ტრანსფორმატორები აღჭურვილია მრგვალ ციფერბლათიანი და სასიგნალო კონტაქტებიანი მანომეტრული თერმომეტრებით. თერმომეტრი მაგრდება ავზის კედელზე ტრანსფორმატორის გორვის ღონედან 1,5 m სიმაღლეზე.

3333 kVA და მეტი სიმძლავრის ერთფაზა, და 7500 kVA და მეტი სიმძლავრის სამფაზა ტრანსფორმატორები აღჭურვილია მოწყობილობით ზეთის ტემპერატურის დისტანციური გაზომვისათვის.

გ) ტრანსფორმატორების შემდგომი განვითარების პერსპექტივები. თანამედროვე ენერგეტიკა სატრანსფორმატორო მრეწველობას მთელ რიგ ახალ ამოცანებს უყენებს. ქვემოთ მოკლედ იქნება მოცემული ზოგიერთი მათგანი, რომელთა გადაწყვეტაზე მუშაობს ამჟამად სამეცნიერო ტექნიკური ახრი.

1. ძალთაგანი ტრანსფორმატორები ძალზე მაღალ ძაბვაზე. ელექტრული სადგურების სიმძლავრების და ელექტრული ენერჯის გადაცემის სიხშირის ზრდასთან ერთად, იზრდება ქსელების და მასასადამე ტრანსფორმატორების ძაბვა. დღემდე ელექტრულ სისტემებში ათვისებულ ყველაზე მაღალ ძაბვას წარმოადგენს 290 kV—ბოულდერ დემის სისტემაში (ა. შ. შ). ეს ზღვარი მნიშვნელოვნად იქნება გადაჭარბებული სსრკაში კუბიშვილის ჰიდროსადგურის აშენებით, რომლის ძაბვა ტოლი იქნება დაახლოებით 400 kV.

ტრანსფორმატორების აგება ასეთ მაღალ ძაბვაზე წარმოადგენს სერიოზულ პრობლემას. ძნელია ტრანსფორმატორის საკმაო ელექტრული სიმ-

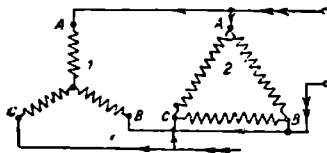
¹ გაზური რელე მოქმედებაში მოდის გაზებით, რომლებიც შეიქმნება ტრანსფორმატორის შიგნით ავარიის დროს.

ტკიცის უზრუნველყოფა. ისეთ ტრანსფორმატორში, სადაც უმაღლესი ძაბვა შეიძლება 220 kV ტოლი იყოს, მაშინ ორივე გრაგნილი შესრულებული უნდა იქნეს, როგორც არამარეზონირებელი. რთულია აგრეთვე დიდი საიზოლაციო მანძილების დროს მოკლედ შერთვის დასაშვები ძაბვის უზრუნველყოფა. შემდეგ უნდა მიეთითოს ასეთი ტრანსფორმატორის გამოყენების შესრულების სირთულეზე. საკმარისია აღინიშნოს, რომ ხაზურ იზოლატორს 400 kV-ზე უნდა ქონდეს სრული სიგრძე დაახლოებით $7 \div 8$ მ. ტრანსპორტი ასეთი ტრანსფორმატორის, რომლის წონა გაიზომება ასეული ტონობით და რომელიც ალბათ გამოვა რკინიგზის ვაბარტის ზღვრებიდან, წარმოადგენს აგრეთვე დამოუკიდებელ რთულ ამოცანას. ასეთი მაღალი ძაბვის დროს ისეთი საკითხები, როგორც ძაბვის რეგულირება, სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორების აგება და ა. შ., აგრეთვე წარმოადგენს სერიოზულ სიძნელეებს.

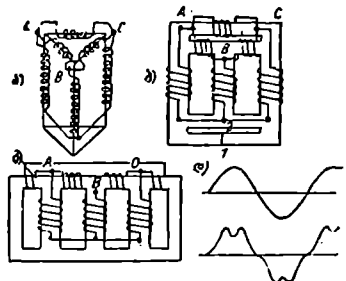
ეკვგარეშეა, რომ იმ დიდი გაქანების პირობებში, რომელიც მიიღო საგამოკვლევო მუშაობამ კუბიშევის სისტემის მშენებლობასთან დაკავშირებით, 400 kV ძაბვაზე ტრანსფორმატორების ათვისების ამოცანა სსრ კავშირში წარმატებით იქნება გადაწყვეტილი.

2. ტრანსფორმატორები სინუსოიდური დამამაგნიტებელი დენით. დამამაგნიტებელ დენის უმაღლესი ჰარმონიკები ამახინჯებს ელექტრულ დანადგარებში დენის და ძაბვის მრუდებს და შედეგად იწვევს საექსპლოატაციო დაბრკოლებებს, განსაკუთრებით საკაბელო ქსელებში. ისინი ზღუდავენ აგრეთვე, ზღვრულ დასაშვებ ინდუქციას ტრანსფორმატორში, ვინაიდან გულანას გაელენის ზრდასთან ერთად იზრდება უმაღლესი ჰარმონიკების პროცენტული შემადგენლობა. ამიტომ უქანასკნელ წლებში საკაბელო ქსელების გაფართოებასა და სატრანსფორმატორო ფოლადში ხედრითი დანაკარგების მნიშვნელოვნად შემცირებასთან დაკავშირებით, დამამაგნიტებელ დენში უმაღლესი ჰარმონიკების შემცირების და ტრანსფორმატორებში ინდუქციის გაზრდის საკითხი სულ უფრო მეტ ყურადღებას იქცევს.

არსებობს რიგი წინადადებებისა, რომლებიც ეხება დამამაგნიტებელ დენში უმაღლეს ჰარმონიკებთან ბრძოლის



ნახ. 265. ხაზურ დენში უმაღლესი ჰარმონიკების კომპენსაცია, ვარსკვლავად და სამკუთხედად შეერთებული ტრანსფორმატორების პარალელურად მიერთების გზით.



ნახ. 266. ნახ. 265-ის სახეშეტვლილი სქემები და უქმი სვლის დენების ოსცილოგრაფები, უმაღლესი ჰარმონიკების კომპენსაციის არსებობის და არარსებობის შემთხვევაში.

მეთოდებს, და აგებულია ტრანსფორმატორები, რომლებშიც დამამაგნიტებელი დენი ძლიერ ახლოა სინუსოიდურთან. ყველაზე უფრო მარტივია ხაზურ დამამაგნიტებელ დენებში უმაღლესი ჰარმონიკების კომპენსაცია ტრანსფორმატორების პარალელურად მიერთების გზით, როდესაც ამ ტრანსფორმატორების გრაგნილები შესაბამისად შეერთებულია ვარსკვლავად და სამკუთხედად, ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 265-ზე.

ცნობილია, რომ ვარსკვლავად და სამკუთხედად შეერთებული, პირველადი გრაგნილების მქონე სამფაზა ტრანსფორმატორების ხაზურ დამამაგნიტებელ დენებში, მე-5, მე-7, მე-17 და მე-19 ჰარმონიკები ურთიერთ დაძრულია 180°-ით. ამიტომ ორი ასეთი, მაგნიტური მხრივ სინეტრიული, ტრანსფორმატორის პარალელურად შეერთებისას, შეიძლება მიღწეულ იქნეს ხაზურ დენებში $6k \pm 1$ (k —ნებისმიერი კენტი რიცხვია) რიგის უმაღლესი ჰარმონიკების თითქმის მთლიანი მოსპობა, მათი ურთიერთ კომპენსაციის შედეგად¹. მაგრამ ორი ტრანსფორმატორის პარალელური შეერთება ყოველთვის არ არის მიზანშეწონილი. ამიტომ სასურველია ვარსკვლავის და სამკუთხედის პარალელურად შეერთების პრინციპი რეალიზებულ იქნეს ერთ ტრანსფორმატორში. ორი გრაგნილის ასეთ შეთავსებას მიყვავართ ისეთ კონსტრუქციამდე, რომელიც სქემატურად ნაჩვენებია ნახ. 266, ა-ზე და წარმოადგენს ორი მაგნიტური სისტემის შეწყვილებას, რომელთაგან ერთი შეერთებულია ვარსკვლავად, ხოლო მეორე—სამკუთხედად. მაგნიტური ნაკადები ამ კომბინირებულ გულანას ღეროებში, მაგნიტური ნაკადების მიმართ უღლებში ღროის მიხედვით დაძრულია 30°—სავსებით ისე, როგორც მაგნიტური ნაკადები ნახ. 265-ზე მოცემულ 1 და 2 ტრანსფორმატორების ღეროებში. ამიტომ ღეროები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ვარსკვლავად შეერთებულ გრაგნილის მათზე განლაგებისათვის, უღლები კი სამკუთხედად შეერთებულ გრაგნილისათვის. თუ ნახ. 266, ა-ზე მოცემულ ტრანსფორმატორის ღეროებს და უღლებს მოვითავსებთ ერთ სიბრტყეში, მივიღებთ ნახ. 266, ბ-ზე გამოსახულ ტრანსფორმატორს.

ამ ტრანსფორმატორის სხვა მოდიფიკაციას წარმოადგენს ნახ. 266 გ-ზე წარმოადგენილი ხუთღეროიანი ტრანსფორმატორი. ასეთი ტრანსფორმატორი შიილება სამღეროიანად (ნახ. 266, ბ), თუ უკანასკნელის ზემო და ქვემო ნახევარუღლებს გაეჭრით 1—2 კვეთზე და გაჭრილ ნახევრებს ჩაკვეტავთ ღეროების პარალელურად. ნახ. 266, დ-ზე მოყვანილია ხუთღეროიანი ტრანსფორმატორის უკმა სელის დენების ოსცილოგრამები, უღლების ჩაკეტილი და გახსნილი გრაგნილების შემთხვევაში².

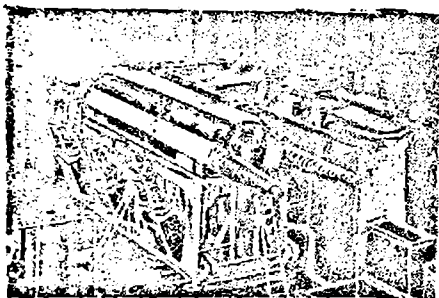
პრაქტიკაში გამოიყენება ნახ. 266-ზე მოცემული სქემების სხვადასხვა მოდიფიკაცია. ასეთი ტრანსფორმატორები აიგება სხვადასხვა სიმძლავრეებზე, 100.000 kVA-მდე.

¹ ერთი ტრანსფორმატორის მე-5 ჰარმონიკული დენი კომპენსირდება მეორე ტრანსფორმატორის დენის ამავე ჰარმონიკით და ა. შ.

² ხუთღეროიან ტრანსფორმატორებზე გაერკვლება პოვეს გერმანიაში. ისინი საშუალებას გვაძლევს, შევამციროთ გულანას სიმაღლე და ამით გავხარდოთ რკინიგზის ვაბარტიში ჩასწერ ტრანსფორმატორის ზღვრული სიმძლავრე.

3. მოძრავი ტრანსფორმატორები. დიდი ტრანსფორმატორების ტრანსპორტი და მათი მონტაჟი დაყენების ადგილას წარმოადგენს სერიოზულ ტექნიკურ ამოცანას. ბევრ შეთხვევაში მძლავრი ტრანსფორმატორების ზომები გამოდის რკინიგზის გაბარიტის ზღვრებიდან, და გვიხდება მათი ნაწილობრივ დაშლილი სახით გადატანა უიზოლატორით, ურადიატორით და ა. შ. ხშირად. ტრანსფორმატორის ადგილზე მიტანის გასაადვილებლად აშოსალებ ნაწილს ათავსებენ შემცირებული ზომების დროებით ავზში, რომელიც გადააქვთ რკინიგზის სპეციალური დადაბლებული ბაქნით. თავისთავად ცხადია, რომ ტრანსფორმატორების ტრანსპორტის ასეთი საშუალებები, მნიშვნელოვნად ართულებს და აგრძელებს მათი მონტაჟის და ექსპლოატაციაში გაშვების ვადებს.

აქედან აღიძრა მისწრაფება, გაკეთდეს ასეთი ტრანსფორმატორები უფრო კომპაქტური და გადასატანად მოსახერხებელი, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის სისტემის სარგებერვო სამძლავრეს. იგივე ტენდენციებს ადგილი აქვს ნაკლები სიმძლავრის ტრანსფორმატორებისათვისაც, რომლებმაც ექსპლოატაციის პირობების მიხედვით მუდამ უნდა იცვალონ ადგილი (მაგალითად ტრანსფორმატორები, რომლებიც მუშაობენ ტორფდამუშავებაზე და სხვ.).



ნახ. 267. მოძრავი ტრანსფორმატორი სიმძლავრით 120 000 kVA და უმაღლესი ძაბვით 220 kV.

ბია ასეთი სამუშაო ტრანსფორმატორი 120 000 kVA სიმძლავრით და 220 kV უმაღლესი ძაბვით. ტრანსფორმატორის სიმძლავრის შემცირების მიზნით, მისი გულანა ზუთლეროიანია, რაც ნებას გვაძლევს შევიმციროთ უღლების სიმძლავრე, სამღეროიან კონსტრუქციასთან შედარებით. გამავალი იზოლატორები განლაგებულია ჰორიზონტალურად. ტრანსფორმატორის ავზი წარმოადგენს რკინიგზის ბაქნის შემადგენელ ნაწილს.

ნახ. 268-ზე ნაჩვენებია 10 000 kVA სიმძლავრის მოძრავი ტრანსფორმატორი, რომელიც დადგმულია, ქალაქის პირობებში, ტრანსფორმატორების ტრანსპორტისათვის განკუთვნილ ავტოურიკებზე.

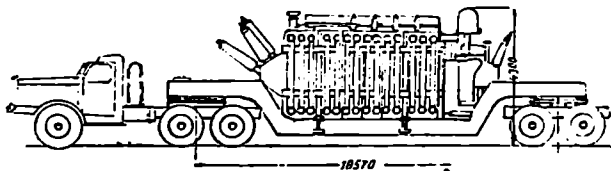
4. ტრანსფორმატორების მართვის ავტომატიზაცია. სიმძლავრეების ზრდა და თანამედროვე ელექტრული სისტემების გართულება, მოითხოვს კონტროლის და მართვის პროცესების ავტომატიზაციას. ტრანსფორმატორებში პირველ რიგში ავტომატიზირებული უნდა იქნეს ძაბვის

რეგულირება, ტემპერატურის კონტროლი და ხელოვნური გაცივების რეგულირება.

ყველაზე მეტი პრაქტიკული მნიშვნელობის ამოცანას წარმოადგენს ძაბვის ავტომატური რეგულირება. ამ საკითხს უკანასკნელ ხანებში დიდი ყურადღება ექცევა. არსებობს სქემების რიგი, ძაბვის ავტომატური რეგულირებისათვის რელეებით, რომელთაგან ზოგიერთი ანხორციელებს რეგულირებას 1%-მდე სიზუსტით. ტრანსფორმატორები ძაბვის ავტომატური რეგულირებით სულ უფრო შედიან ხმარებაში.

ეს პრობლემა განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს სსრ კავშირში, სადაც ელექტრომურწობაში პროცესების ავტომატიზაცია წარმოადგენს ერთერთ უმნიშვნელოვანეს ამოცანას.

5. ტრანსფორმატორები უწყვადი სინთეზური ზეთით. ბოლო ხანებამდე მინერალური სატრანსფორმატორო ზეთი წარმოადგენდა თხევადი იზოლაციის ერთადერთ სახეს, რომელიც გამოიყენებოდა ტრანს-



ნახ. 268. ავტორიჩაზე დაყენებული მოძრავი ტრანსფორმატორი სიმძლავრით 10 000 kVA.

ფორმატორებში. მაღალ საიზოლაციო თვისებებთან და სითბოს მოშორების კარგ უნართან ერთად, სატრანსფორმატორო ზეთს აქვს ზოგიერთი ნაკლი, რომლებსაც მიეკუთვნება:

ა) ზეთის აალებადობა და წვადობა და მისი მიდრეკილება გაზების გამოყოფისადმი, რაც ხანდახან იწვევს აფეთქებებს და ხანძარს;

ბ) ზეთის დაძველება, ე. ი. ექსპლואატაციის პროცესში მისი ფიზიკო-ქიმიური თვისებების შეცვლა, რაც მნიშვნელოვნად აქვეითებს მის ხარისხს. დაძველება ზრდის ზეთის სიბლანტეს, რაც აუარესებს კონვექციის გზით თბოგადაცემას; დაძველების შედეგად ზეთის მჟავიანობის ზრდა მავნელ მოქმედებს ტრანსფორმატორის ქაღალდის იზოლაციაზე. ამიტომ აუცილებელია ზეთის პერიოდული რეგენერაცია.

გ) ზეთის ჰიგროსკოპიულობა ან წყლის სატრანსფორმატორო ზეთში გახსნის, და მდგრადი ემულსიების შექმნის უნარი.

დ) ზეთის, 2,3-ის ტოლი, შედარებით დაბალი დიელექტრიკული კოეფიციენტი, მაშინ, როდესაც ტრანსფორმატორებში გამოყენებულ მყარ საიზოლაციო მასალებს აქვთ დაახლოებით ორჯერ მეტი დიელექტრიკული კოეფიციენტი, რის გამო ზეთისა და მყარ საიზოლაციო მასალებისაგან კომ-

ბინირებული იზოლაციის ყველა შემთხვევაში ზეთში შეიქმნება შედარებით მაღალი ელექტრული გრადიენტები, რომლებიც აქვეითებენ კონსტრუქციის სიმტკიცეს.

ამიტომ ბოლო ხანებში დაისახა მისწრაფება სატრანსფორმატორო ზეთის შემცვლელების შექმნისაკენ, რომლებიც თავისუფალი იქნებიან ამ ნაკლისაგან. ასეთი შემცვლელები თანდათანობით ინერგება სხვადასხვა ქვეყნების ტრანსფორმატორთმშენებლობაში. მსგავსი შემცვლელი „სოვტოლის“ სახელწოდებით მიღებულია სსრკ ვიშირში. სოვტოლი წარმოადგენს ბენზოლის პიროლიზის პროდუქტს, მისი შემდგომი ქლორირებით. შედეგად მიიღება პროდუქტი, რომლის ძირითად თვისებებს წარმოადგენს:

ა) უწყვადობა;

ბ) შედარებით მაღალი დიელექტრიკული კოეფიციენტი (დაახლოებით 4—5-ის ტოლი);

გ) დაახლოებით სატრანსფორმატორო ზეთის სიმტკიცის ტოლი მაღალი ელექტრული სიმტკიცე;

დ) მეტი სტაბილობა, ვიდრე აქვს სატრანსფორმატორო ზეთს.

სოვტოლის სხვა თვისებებიდან უნდა აღინიშნოს მისი შედარებით დიდი ხვედრითი წონა ($1,5 \div 1,6$). ამის შედეგად ტრანსფორმატორის ავზში მოხვედრილი ტენის წვეთები, კი არ დაილქება ფსკერზე (როგორც სატრანსფორმატორო ზეთის შემთხვევაში), არამედ შედარებით სწრაფად აორთქლდება. უნდა აღინიშნოს, რომ ნორმალური ტემპერატურის დროს, სოვტოლის სიბლანტე გაცილებით მეტია სატრანსფორმატორო ზეთის სიბლანტეზე. მაგრამ მუშა ტემპერატურის დროს (დაახლოებით 100°C) სოვტოლის სიბლანტე დაახლოებით ზეთის სიბლანტის ტოლია.

განსაკუთრებული პერსპექტივები აქვს სოვტოლის გამოყენებას მძიმე ტემპერატურულ, აფეთქების მხრივ საშიშ და ხანძარსაშიშ პირობებში (შახტები, ელექტრომაგლები, ელექტროლუმენების დანადგარები, თეატრები და ა. შ.) მომუშავე ტრანსფორმატორებში.

6. შეკუმშული გაზით შევსებელი ტრანსფორმატორები. ექსპერიმენტალურ გამოკვლევათა რიგმა გვიჩვენა, რომ გაზის წნევის ზრდასთან ერთად იზრდება მისი გამრღვევი ელექტრული სიმტკიცე, ამასთან საკმაოდ ფართო ზღვრებში 50 H_2 -ის დროს ელექტრული სიმტკიცე, დაახლოებით წნევის პროპორციულია. ასევე საკმაოდ კარგია შეკუმშულ გაზში თბოგადაცემა კონვექციით. ეს ქმნის მთელ რიგ შემთხვევებში, სატრანსფორმატორო ზეთის შეცვლის პერსპექტივას შეკუმშულ გაზით და პირველ რიგში აზოტით.

ცდა გვიჩვენებს, რომ $10\text{--}15 \text{ at}$ წნევისას გაზის სიმტკიცე 50 H_2 -ის შემთხვევაში ორ-სამჯერ მეტია სატრანსფორმატორო ზეთის სიმტკიცეზე. გაზის იმპულსური სიმტკიცე კი შედარებით მცირეა. ამიტომ ზეთის შეკუმშული გაზით შეცვლის დროს შესაძლებელია საიზოლაციო მანძილების შემცირება, ე. ი. წონების და ზომების შემცირება, უმთავრესად სპეციალური და-

ნიშნულების ტრანსფორმატორებში, რომლებშიც იმპულსური სიმტკიცის საკითხებს არა აქვთ არსებითი მნიშვნელობა. მძლავრ ტრანსფორმატორებში ძალზე მაღალ ძაბვებზე ზეთის შეცვლა შეუქმნული გაზით შეიძლება მიზანშეწონილი აღმოჩნდეს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ მოინახება გაზები, საკმაოდ მაღალი იმპულსური სიმტკიცით.

ერთერთ სერაიზულ კონსტრუქციულ ამოცანას წარმოადგენს აგრეთვე ავზში საიმედო შემჭიდროების უზრუნველყოფა, რომელიც მოგვეცემდა გაზის სტაბილური წნევის შენარჩუნების საშუალებას. ავზის მექანიკური სიმტკიცეც ასევე უნდა იქნეს მნიშვნელოვნად გაძლიერებული. ტრანსფორმატორის გადატვირთვის უნარიანობის შეფასების დროს მხედველობაში უნდა ვიქონიოთ, რომ შექმნილი გაზის თბოტევადობა ბევრჯერ ნაკლებია ზეთის თბოტევადობაზე.

7. სატრანსფორმატორო ზეთის დაცვა. ზემოთ აღნიშნული იყო სატრანსფორმატორო ზეთის დაძველების ძველ შედეგები. ზეთის დაძველების ერთ-ერთ ძირითად მიზეზს წარმოადგენს მისი დაჟანგვა. ამიტომ ზეთის დაძველებისაგან დაცვის საშუალებას წარმოადგენს მისი დაცვა ჰაერის ეანგბადისაგან. უკანასკნელ ხანეში ამ საკითხს დიდი ყურადღება ექცევა.

დამუშავებულია ზეთის ჰაერთან შეხებისაგან დაცვის საშუალებები. ყველა ესენი დაიყვანება ზეთთან შეხებაში მყოფ ჰაერის, რომელიმე ინერტული გაზით შეცვლაზე. უფრო ხშირად, ამ მიზნისათვის გამოიყენება აზოტი. ამავე დროს გათვალისწინებულია, რომ ზეთის მოცულობის შემცირებასთან ერთად, აზოტი შედის ავზში და პირიქით.

სატრანსფორმატორო ზეთის დაცვის შემთხვევაში, გამარტივებულია ზეთის მოვლა, და რაც მთავარია მცირდება ტრანსფორმატორის იზოლაციის გაცვეთა. ზოგიერთი მონაცემების მიხედვით ზეთის აზოტური დაცვის გამოყენება ტრანსფორმატორის სამსახურის ვადას ზრდის არა ნაკლებ ვიდრე ორჯერ, რააც დიდი მნიშვნელობა აქვს ენერგეტიკული დანადგარებისათვის.

8. მასალების სხვა პრობლემები. თანამედროვე ტრანსფორმატორთმშენებლობის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს ამოცანას წარმოადგენს, როგორც საიზოლაციო, ასევე მაგნიტური მასალების ხარისხის გაუმჯობესება.

აგნიტური მასალები. ძირითად ამოცანას ამ დარგში წარმოადგენს ხვედრითი დანაკარგების და ხვედრითი დამამაგნიტებელი სიმძლავრის შემდგომი შემცირება, რაც მოგვეცემდა უფრო სრულყოფილი კონსტრუქციების შექმნის საშუალებას. ამ სიდიეების მნიშვნელობა OCT 6391-ის მიხედვით მოცემული იყო I ნაწილში, § 6, ბ.

წარმატებანი სპეციალური ფოლადის მეტალურგიის დარგში უფლებას გვაძლევს ჩავთვალოთ, რომ OCT-ით მოცემული ხვედრითი დანაკარგების მნიშვნელობანი შესაძლოა საგრძნობლად იქნეს შემცირებული. თავისთავად ცხადია ასეთი შემცირების უზარმაზარი ეკონომიური ეფექტი. ნაკლებ ნათელია ხვედრითი დამამაგნიტებელი სიმძლავრის შემცირების პერსპექტივა. ამ პრობლემის გადაწყვეტა მოგვეცემს უფრო მაღალ ინდუქციებზე გადასვლის საშუალებას, რაც თავის მხრივ მოგვეცემს სპილენძის და ფოლადის მნიშვნელოვან ეკონომიის და გაბარიტების შემცირებას.

საიზოლაციო მასალები. საიზოლაციო მასალების პრობლემა ძირითადად დაიყვანება იზოლაციის ელექტრული სიმტკიცის და თბომდგრადობის გაზრდის საკითხებამდე. თბომდგრადობის პრობლემის მნიშვნელობის შეფასებისათვის, შეიძლება მივუთითოთ, რომ ცნობილ, პრაქტიკულად მნიშვნელოვან ზღვრებში, ტრანსფორმატორში დასაშვები ტემპერატურის 1°C -ით აწევა საშუალებას გვაძლევს აქტიური მასალების იმავე წონის შემთხვევაში, ტრანსფორმატორის საანგარიშო სიმძლავრე გავზარდოთ არა ნაკლებ 1% -ისა. ამგვარად, დასაშვები ტემპერატურების $10\div 15^{\circ}\text{C}$ -ით გაზრდასაც კი შეუძლია მოგვცეს ფრიად მნიშვნელოვანი ეკონომიური ეფექტი.

სატრანსფორმატორო ზეთის შემცვლელების საკითხი, განხილული იყო ზემოთ. რაც შეეხება მყარ იზოლაციას, აქ ყურადღების ღირსია ისეთი მასალები, როგორცაა აზბესტი და მისგან წარმოებული მასალები, მინის ბოქსო, პლასტმასები. ამ მიმართულებით უნდა ჩატარდეს ფართო კვლევითი მუშაობა.

III. ცვლადი დენის მანქანების სამართ. საკითხები

22. ე. მ. დ.-ის ალქვრა ცვლადი დენის ეანქანების გრაგნილებში

როგორც I განყოფილებაში იყო ნაჩვენები, ელექტრული მანქანების გრაგნილები შედგება სტატორის შიგა ზედაპირზე ან როტორის გარე ზედაპირზე ამოტიფრულ ღრმულში ჩაწყობილი რიგი იზოლირებული გამტარებისაგან (ჩვეულებრივად სპილენძი). გამტარები ერთიმეორესთან ერთდება გარკვეული წესით მანქანის შუბლურ ნაწილზე ე. წ. შუბლური შეერთების საშუალებით. ცალკეულ გამტარებში დაინდუქტირებული ე. მ. დ.-ის მნიშვნელობა დამოკიდებული არ არის გამტარების შეერთების რიგზე და წარმოადგენს მაგნიტური არეს სივრცული განაწილების ფუნქციას, რომლის ძალხაზები შემულია გრაგნილთან. გრაგნილის რეზულტიური ე. მ. დ.-ის მნიშვნელობა დამოკიდებულია მასში მიმდევრობით შეერთებული გამტარების რიცხვზე და ე. მ. დ.-ის მნიშვნელობაზე თითოეულ მათგანში. შუბლური შეერთების ფორმა, რომლის მიხედვითაც, უმთავრესად, ხდება გრაგნილების ტიპების კლასიფიკაცია, გავლენას არ ახდენს დაინდუქტირებულ ე. მ. დ.-ზე.

ა) ერთ გამტარში აღძრული ელექტრომაგნიტური ძალა. ელექტრული მანქანის ღრმულში ჩვეულებრივად ჩალაგებულია რამდენიმე გამტარი. ერთი ღრმულის თითოეულ გამტარში დაინდუქტირებული ე. მ. დ. შეიძლება ჩათვალოს ერთმანეთის ტოლად, რადგანაც გამტარები მაგნიტურ არეში პრაქტიკულად თითქმის ერთნაირ პირობებში იმყოფება. ერთი გამტარის ე. მ. დ.-ის მყისა მნიშვნელობა განისაზღვრება განტოლებით

$$e_r = B_r \cdot l \cdot v \quad (22,1)$$

მანქანის ბრუნვის მუდმივი სიჩქარისა და გამტარის უცვლელი l აქტიური სიგრძის შემთხვევაში დაინდუქტირებული ე. მ. დ. პროპორციულია მხოლოდ ინდუქციის B_r ნორმალური მდგენელისა ღრუის წრეხაზის იმ ადგილას, სადაც დროის მოცემულ მომენტში იმყოფება განსახილველი გამტარი. თუ ელექტრული მანქანის საპერო ღრეჩოში ორ საპოლუსო დანაყოფზე B_r ინდუქციის მრუდს აქვს ნახ. 269-ზე ნაჩვენები ფორმა, მაშინ გამტარის ე. მ. დ.-ის დროის მიხედვით ცვლებადობის მრუდს აქვს იგივე ფორმა და განსხვავებულია პირველისაგან მხოლოდ მასშტაბით.

როგორც I ნაწილში იყო ნაჩვენები, აღძრული ე. მ. დ.-ს სიხშირე

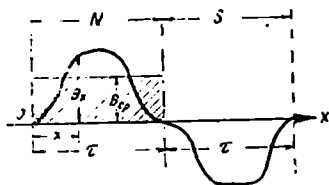
$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad (22,2)$$

თუ ინდუქციის მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღნიშნავთ B_{max} , მაშინ გამტარის ე. მ. ძ.-ის მაქსიმალური მნიშვნელობა

$$e_{max} = B_{max} \cdot l \cdot v. \quad (22,3)$$

ნახევარი პერიოდის განმავლობაში ე. მ. ძ.-ის საშუალო მნიშვნელობა იქნება

$$e_{cp} = B_{cp} \cdot l \cdot v, \quad (22,4)$$



ნახ. 269.

არის საშუალო კვადრატული T პერიოდის განმავლობაში ე. მ. ძ. მყისა მნიშვნელობების კვადრატებიდან

$$e_{აფფ} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e_x^2 dt} \quad (22,5)$$

თუ გამოვიყენებთ (22,1) განტოლებას და მხედველობაში მივიღებთ რომ l და v მუდმივებია, ხოლო ერთ პერიოდს T შეესაბამება ლუზის წრეხაზზე ორი საპოლუსო დანაყოფი (2τ) გვექნება:

$$e_{აფფ} = l \cdot v \sqrt{\frac{1}{2\tau} \int_0^{2\tau} B_x^2 dx} = B \cdot l \cdot v. \quad (22,6)$$

აქ B ინდუქციის ეფექტური მნიშვნელობაა, რომელიც ტოლია:

$$B = \sqrt{\frac{1}{2\tau} \int_0^{2\tau} B_x^2 dx}. \quad (22,7)$$

განგარიშების დროს ჩვეულებრივად სარგებლობენ ერთი პოლუსის ინდუქციის მთლიანი ნაკადით, რომლის საშუალებითაც უფრო ადვილია საშუალო ინდუქციის განსაზღვრა განტოლებიდან:

$$\Phi = B_{cp} \cdot l \cdot \tau \text{ Vsec}. \quad (22,8)$$

აქ Φ — ინდუქციის სრული ნაკადია, l და τ გამოსახულია cm-ში, B_{cp} — V sec/cm².

შეველით რა (22,6) განტოლებაში ინდუქციის ეფექტურ მნიშვნელობას საშუალო მნიშვნელობით, გამტარის ე. მ. ძ.-ისათვის მივიღებთ შემდეგ გამოსახულებას:

$$e_{აფფ} = k_D \cdot B_{cp} \cdot l \cdot v, \quad (22,9)$$

სადაც $k_B = \frac{b}{B_{cp}}$ — არეს ფორმის კოეფიციენტი, რომელიც ინდუქციის

ეფექტური და საშუალო მნიშვნელობების ფარდობის ტოლია. თუ მხედველობაში მივიღებთ (22,8) განტოლებას და ჩავთვლით, რომ მოძრაობის სიჩქარე:

$$v = \frac{\pi D \cdot n}{60} = \frac{2\pi \cdot p \cdot n}{60} = 2\pi f, \quad (22,10)$$

სადაც D — მანქანის საპერო ღრეჩოს საშუალო დიამეტრია, ხოლო $\pi D = 2\pi \cdot p$ — ლუზის წრეხაზის სიგრძეა და f სიხშირე, მაშინ ერთი გამტარის ე. მ. დ.-ის ეფექტურ მნიშვნელობას მაგნიტური არეს ნებისმიერი ფორმისათვის ექნება სახე:

$$k_{\text{ფ}} = 2k_B \cdot f \cdot \Phi. \quad (22,11)$$

აქ Φ — ერთი პოლუსის მაგნიტური ნაკადია $1/\text{sec}$ -ში, f — ე. მ. დ.-ის სიხშირეა H_r -ში.

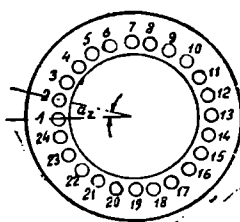
არეს მოცემული ფორმის მიხედვით k_B კოეფიციენტი შეიძლება გამოითვალოს ანალიზურად ან გრაფიკულად. სინუსოიდისათვის კოეფიციენტი k_B ტოლია:

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

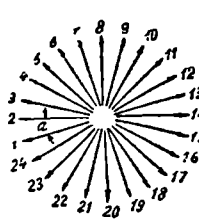
მაშასადამე, სინუსოიდური არეს შემთხვევაში ერთი გამტარის ე. მ. დ.-ის ეფექტური მნიშვნელობა ტოლია

$$k_{\text{ფ}} = 2,22 f \cdot \Phi \quad V. \quad (22,12)$$

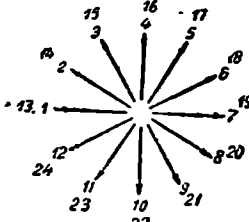
ბ) ღრმულების ელექტრომაგნიტური ძალების ვარსკვლავი. როგორც ცნობილია სინუსოიდური არეს შემთხვევაში ე. მ. დ. შეიძლება წარმო



ა)



ბ)



გ)

ნახ. 270. სინქრონული მანქანის სტატორის ღრმულების ე. მ. დ.-ის ვარსკვლავი.

ა) — სტატორი $z=24$ ღრმულით. ბ) — ე. მ. დ.-ის ვარსკვლავი $2p=2$. გ) — ე. მ. დ.-ის ვარსკვლავი, როდესაც $2p=4$.

ვიდგინოთ $\omega = 2\pi f$ კუთხური სიჩქარით მბრუნავ ვექტორებად, რომელიც ლუზის წრეხაზზე გამტარების განლაგების შესაბამისად ფაზითაა დაძარული ერთიმეორის მიმართ. მაგალითად ნახ. 270, ა-ზე მოცემულია სინქრონული

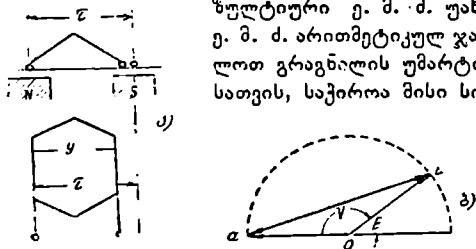
მანქანის სტატორი ღრმულთა რიცხვით $Z=24$. ყოველ ღრმულში მოთავსებულია ერთი გამტარი. მეზობელ ღრმულებს შორის კუთხე ტოლია

$$\alpha = \frac{360^\circ}{Z} = 15^\circ. \text{ თუ ავაგებთ ე. მ. დ. ვექტორების დიაგრამას ორპოლუსა როტორის შემთხვევაში, მივიღებთ ვარსკვლავს } Z=24 \text{ სხივით, რომლებიც ურთიერთ-განლაგებულია კუთხით } \alpha = \alpha, \text{ (ნახ. 270, ბ). მრავალპოლუსა სტატორის შემთხვევაში } (p > 1, \text{ მავალითად, } p=2) \text{ დიაგრამის აგებისას აუცილებელია ე. მ. დ.-ის ვექტორების გადადება } \alpha = p \cdot \alpha, \text{ კუთხით, რადგანაც ვექტორის } 360 \text{ ელექტრული გრადუსით მობრუნებას შეესაბამება სტატორის წრებაზე ძვრა, რომელიც წრებაზის მხოლოდ } \frac{1}{p} \text{ ნაწილის ტოლია. დიაგრამაზე ყველა } Z \text{ ვექტორის დატანის დროს წრებაზე } p\text{-ჯერ შემოუვლით და } p\text{-გავაკეთებთ შემობრუნებას } \alpha \cdot Z = p \cdot \alpha \cdot Z = p \cdot 360 \text{ ელექტრული გრადუსის ტოლი კუთხით (ნახ. 270, გ).}$$

ან გვარად, ერთ გრადუსს სივრცეში ვექტორულ დიაგრამაზე შეესაბამება p ელექტრული გრადუსი, განხილულ ე. მ. დ.-ის ვექტორულ დიაგრამას შემოკლებით ღრმულთა ვარსკვლავი ელ. დიაგრამა.

გ) ზვევში და კოკში აღძრული ელექტრომაგნიტური ძალა. გრაგნილის გამტარები ერთიმეორესთან შეერთების დროს ჰქმნიან ხვევებს. წინასწარი შეთანხმებით გამტარის ბოლოებს, რომლებიც ნახაზზე ჩვენსკენაა მიმართული, ვუწოდოთ გამტარების დასაწყისები. ხოლო მათ მოპირდაპირეებს—გამტარის ბოლოები. ე. მ. დ. ჩავთვალოთ დადებითად, თუ ის მიმართულია გამტარის თავიდან ბოლოსაკენ.

ელექტრული მანქანის სწორად დაგეგმარებულ გრაგნილში მიმდევრობით შეერთებული გამტარების ე. მ. დ. ისეთნაირად უნდა ჯამდებოდეს, რომ რეზულტიური ე. მ. დ. უახლოვდებოდეს ამ გამტარების ე. მ. დ. არითმეტიკულ ჯამს. ეს პირობა რომ შევასრულოთ გრაგნილის უმარტივესი ელემენტისათვის—ხვევისათვის, საჭიროა მისი სიგანე y , რომელსაც ბიჯი ეწოდება, ავირჩიოთ დაახლოებით საპოლუსო დანაყოფის (τ) ტოლი (ნახ. 271, ა.) y ბიჯი გამოსახულია საპოლუსო დანაყოფის (τ) ნაწილებში, ან კბილთა რიცხვით ხვევის ორი აქტიურ მხარეს შორის.



ნახ. 271.

ვექტორულ დიაგრამაზე ე. მ. დ.-ის არითმეტიკულ შეკრებას შეესაბამება გამტარების ე. მ. დ.-ის ვექტორების გეომეტრიული გამოკლება, ვინაიდან გამტარები ხვევის შექმნის დროს ერთმანეთთან შეერთებულია ბოლოებით, ე. ი. ერთიმეორის შემხვედრად (ნახ. 271, ა). ორპოლუსა მანქანაში დიამეტრულად საწინააღმდეგო ღრმულებში, ან მრავალპოლუსა მანქანაში τ საპოლუსო დანაყოფით დაშორებულ ღრმულებში მდებარე გამტარების შეერთება გვაძლევს

ხვევს დიამეტრული ბიჯით. თუ შესაერთებელი გამტარები დაცილებულია საპოლუსო დანაყოფზე მეტი ან ნაკლები მანძილით, მაშინ ხვევს აქვს შემოკლებული ანუ შემციობებული ბიჯი. დიამეტრული ბიჯის $\gamma = \tau$ შემთხვევაში ხვევის ე. მ. დ. უდრის ერთი გამტარის ე. მ. დ.-ის ორმაგ მნიშვნელობას, რაც უშუალოდ გაპომდინარეობს 180 ელექტრული გრადუსით დაძრული ე. მ. დ.-ის ვექტორების გომეტრიული გამოკლებიდან (ნახ. 271, ა და 271, ბ). არასინუსოიდური არეს შემთხვევაში, როდესაც ვექტორული დიაგრამის გამოყენება შეუძლებელია, ე. მ. დ. გაორკეცებას მაინც აქვს ადგილი. ეს მდგომარეობა იმით აიხსნება, რომ მეზობელ პოლუსების ქვეშ მაგნიტური არეს სიმეტრიულობის გამო ხვევის ორივე გამტარის ე. მ. დ. შესაბამის მყისა მნიშვნელობებს აღწევენ ერთდროულად და, თუმცა მათი ნიშნები სხვადასხვაა, მაგრამ გამტარების შემხვედრი შეერთების გამო ხვევის კონტურში მოქმედებენ თანხედენილად. ზოგად შემთხვევაში დიამეტრული ბიჯის დროს ხვევის ე. მ. დ.-ის ეფექტური მნიშვნელობა

$$e_w = 2e_{\text{აფფ}} = 4k_B f \cdot \Phi, \quad (22,13)$$

სადაც $e_{\text{აფფ}}$ —ერთი გამტარის ე. მ. დ. (22,11).

გრაგნილის ე. მ. დ.-ის გადიდების მიზნით ხვევებს აერთებენ მიმდევრობით. ხვევების ჯგუფს, რომლებიც ჩაწყობილია ერთი და იგივე ღრმულეებში და რომელთაც ცალკეული გამტარების იზოლაციის გარდა აქვთ აგრეთვე ღრმულის კედლებიდან გასამხოლოებელი საერთო იზოლაცია, ეწოდება კოქა, W_k ხვევისაგან შემდგარ კოქას ე. მ. დ.-ის ეფექტური მნიშვნელობა დიამეტრული ბიჯის შემთხვევაში:

$$E = w_k \cdot e_{\text{აფფ}} = 4k_B \cdot f \cdot w_k \cdot \Phi \quad V. \quad (22,14)$$

სინოსოიდური არეს შემთხვევაში კოქას ე. მ. დ. უდრის

$$E = 4,44 f \cdot w_k \cdot \Phi \quad V. \quad (22,15)$$

ე. მ. დ.-ის შექმნის თვალსაზრისით w_k ხვევისაგან შემდგარი კოქა ერთი ხვევის ეკვივალენტურია. ამიტომ ასეთი გრაგნილის ვექტორების ვარსკვლავის აგების დროს მიზანშეწონილია არა გრაგნილის შემადგენელი ყოველი გამტარის ე. მ. დ.-ის ვექტორის დატანა, არამედ ერთი და იგივე ღრმულეში მოთავსებული w_k გამტარების ერთობლიობისათვის, რომელიც კოქას აქტიური ი მხარეს სახელწოდებას ატარებს.

სხვადასხვა მიზეზების გამო, რომელიც აღნიშნული იქნება ქვემოთ, თანამედროვე გრაგნილები, როგორც წესი, სრულდება შემოკლებული ბიჯიანი კოქათი (ხვევით). ამ შემთხვევაში კოქას ე. მ. დ. ნაკლებია, ვიდრე აქტიური მხარეების ე. მ. დ.-ის არითმეტიკული ჯამი. კოქაში ან ხვევაში შემოკლებული ბიჯის შემთხვევაში ყოველი აქტიური მხარის დაინდუქტირებული ე. მ. დ. დაძრულია ერთიმეორისაგან ფაზით არა 180 ელექტრული გრადუსით, არამედ 180-ზე ნაკლები კუთხით.

თუ კოქას ბიჯია γ (ნახ. 271, ა), მაშინ სინუსოიდური არეს შემთხვევაში აქტიური მხარეების ე. მ. დ.-ბი დაძრულია კუთხით

$$\gamma = \frac{\gamma}{\tau} \pi. \quad (22,16)$$

როგორც ზემოგანხილულიდან ჩანს, კუთხე π ვექტორულ დიაგრამაზე ლუზის წრეხაზზე შეესაბამება τ მანძილს.

ნახ. 271,ბ-ზე მოყვანილია კოქას აქტიური მხარეების ე. მ. დ.-ის ვექტორული დიაგრამა შემოკლებული ბიჯის შემთხვევისათვის. კოქას ე. მ. დ. \overline{oa} და \overline{ob} ვექტორების გეომეტრიული სხვაობის ტოლია

$$\overline{E} = \overline{oa} - \overline{ob} = \overline{ba}, \quad E = 2\overline{oa} \sin \frac{\gamma}{2} = 2\overline{oa} \cos \frac{\varepsilon}{2}.$$

აქ კუთხე $\varepsilon = \pi - \gamma = \pi \frac{\tau - \gamma}{\tau}$.

ვინაიდან \overline{oa} წარმოადგენს კოქას ერთი აქტიური მხარის ე. მ. დ., ცხადია, რომ $2\overline{oa}$ წარმოადგენს კოქას ე. მ. დ. დიამეტრალური ბიჯის შემთხვევაში. მივიღებთ რა მხედველობაში (22,15) განტოლებას, კოქას ე. მ. დ.-ის ეფექტური მნიშვნელობისათვის შემოკლებული ბიჯის შემთხვევაში გვექნება:

$$E = 4,44 f \cdot w_k \cdot \Phi \cdot \sin \frac{\gamma}{2}. \quad (22,17)$$

კოეფიციენტი $\sin \frac{\gamma}{2}$ გვიჩვენებს კოქას ე. მ. დ. შემცირებას კოქას ბიჯის შემოკლების შემთხვევაში და მას ბიჯის შემოკლების ანუ შემცირების კოეფიციენტს უწოდებენ.

$$k_p = \sin \frac{\gamma}{2} = \cos \frac{\varepsilon}{2}. \quad (22,18)$$

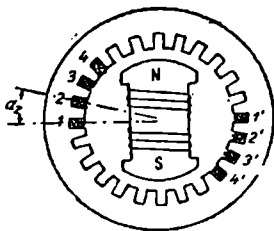
ამ მნიშვნელობის (12,17) განტოლებაში ჩასმით მივიღებთ:

$$E = 4,44 f \cdot k_p \cdot w_k \cdot \Phi. \quad (22,19)$$

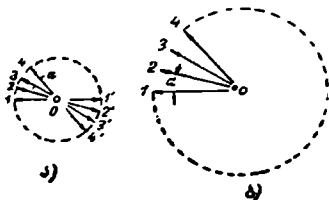
არასინუსოიდური არეს შემთხვევაში შემოკლებულბიჯიანი კოქას ე. მ. დ. შეიძლება გამოეთვალათ, თუ ინდუქციის მრუდს დაეშლით ძირითადი და უმაღლესი რიგის ჰარმონიკებად და ყოველი მათგანისათვის განვსაზღვრავთ შემოკლების კოეფიციენტს (22,18) განტოლების ანალოგიურად (იხ. ქვემოთ).

დ) ერთფაზა გრაგნილის ელექტრომაგნიტური ძალა სინუსოიდური არეს შემთხვევაში. გრაგნილის ე. მ. დ.-ის გაზრდა კოქაში ხვევების მიმდევრობით შეერთების საშუალებით შეზღუდულია ღრმულების ზომებით. გრაგნილის ე. მ. დ.-ის შემდგომი გაზრდისათვის გვიხდება გადავიდეთ მეზობელ ღრმულებში მოთავსებულ რამდენიმე კოქას მიმდევრობით შეერთებაზე. თუ ყველა კოქას ხვევთა ერთი და იგივე რიცხვი აქვს, მაშინ კოქების ე. მ. დ.-ის ამპლიტუდები ტოლია, მაგრამ სხვადასხვა ღრმულებში მათი განაწილების გამო დაძრულია ფაზით. ნახ. 272-ზე სქემურად ნაჩვენებია ორპოლუსა სინქრონული მანქანა ერთფაზა გრაგნილით, რომელიც შედგება დიამეტრული

ბიჯის ოთხი კოქისაგან. კოქებს პოლუსის ქვეშ უკავია $q=4$ ღრმული. აქტიური მხარეებში დაინდუქტირებული ე. მ. დ.-ის ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე ტოლია მეზობელ ღრმულებს შორის კუთხის $\alpha = \rho \cdot \alpha_s = \frac{2\pi}{Z} \rho$, რომელიც გამოსახულია ელექტრულ გრადუსებში. აქ Z —მანქანის ღრმულთა (კბილების) სარული რიცხვია.



ნახ. 272. სინქრონული მანქანის სტატორი $q=4$ შევსებული ღრმულით.



ნახ. 273.

ვინაიდან გრაგნილს უკავია ღრმულების ნაწილი, ამიტომ აქტიური მხარეების ე. მ. დ.-ის ვექტორული დიაგრამა წარმოადგენს არასრულ ვარსკვლავს (ნახ. 273, ა).

თუ $O1'$ ვექტორს დავემატებთ შებრუნებული ნიშნით $O1$ ვექტორს, მივიღებთ ვექტორს, რომელიც სიდიდითა და ფაზით გამოსახავს კოქას ე. მ. დ.-ს, სრულიად ანალოგიურად ყველა კოქისათვის მივიღებთ ნახ. 273,ბ-ზე ნაჩვენებ დიაგრამას, რომელიც შედგება ერთიმეორისაგან იგივე α კუთხით დაბრული q სხივისაგან.

ურთიერთ შორის მიმდევრობით შეერთებულ (ერთი კოქას ბოლო შეერთებულია მეორე კოქას დასაწყისთან და ა. შ.) q კოქისაგან შექმნილი მთელი გრაგნილის (ფაზის) ელექტრომომძრავებელი ძალა q ვექტორების გეომეტრიული ჯამის ტოლია (ნახ. 273,ბ).

ერთიმეორის მიმართ $\alpha = \frac{2\pi\rho}{Z}$ -ის ტოლი კუთხით მობრუნებული ვექტორების გეომეტრიული შეკრების შედეგად მივიღებთ $\frac{Z}{p}$ კუთხედის ნაწილს

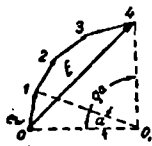
(ნახ. 274), რომელიც q გვერდისაგან შედგება.

ცხადია, რომ მრავალკუთხედის თითოეულ გვერდზე დაყრდნობილი ცენტრალური კუთხე ტოლია $\alpha = \frac{2\pi}{Z} \rho \cdot q$ კოქას ე. მ. დ.-ის გეომეტრიული ჯამის გამოსახვა მეტად იოლია, ამავე კოქების ე. მ. დ.-ის არითმეტიკული ჯამის საშუალებით. გეომეტრიული ჯამის შეფარდება არითმეტიკულ ჯამთან აღენიშნოთ

$$k_p = \frac{E}{q \cdot \epsilon_w} = \frac{q \text{ კოქას ე. შ. დ. გეომეტრიული ჯამი}}{\text{ამავე ე. შ. დ. არითმეტიკული ჯამი}},$$

სადაც E მთელი გრაგნილის ე. შ. დ. და ტოლია გეომეტრიული ჯამის (ვექტორი 04), ხოლო ϵ_w ერთი კოქას ე. შ. დ. (ვექტორი 01, ნახ. 274), ამის შემდეგ q ღრმულებში განაწილებული გრაგნილის ე. შ. დ.-ის ეფექტური მნიშვნელობა დიამეტრული ბიჯის შემთხვევაში ტოლია

$$E = k_p \cdot q \cdot \epsilon_w = 4,44 f \cdot k_p \cdot q \cdot \omega_b \cdot \Phi. \quad (22,20)$$



კოეფიციენტი $k_p < 1$ აღრიცხავს გრაგნილს ე. შ. დ.-ის შემცირებას გრაგნილის რამდენიმე ღრმულში განაწილების გამო. მას გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტი ეწოდება. k_p კოეფიციენტი შეიძლება განვსაზღვროთ ნახ. 274-ზე ნაჩვენებ დიაგრამიდან. ამისათვის რეზულტიური ე. შ. დ. თვის (00,1) სამკუთხედიდან 01 = ϵ_w გამოვსახოთ მრავალკუთხედის გარშემოწერილობის რადიუსის საშუალებით:

ბით: $\epsilon_w = 2R \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$. ანალოგიურად (00,4) სამკუთხედიდან E მონაკვეთისათვის

გვაქვს $E = 2R \cdot \sin \frac{q\alpha}{2}$. მაშასადამე,

$$k_p = \frac{E}{q \cdot \epsilon_w} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (22,21)$$

როგორც (22,21) ფორმულიდან ჩანს, გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ გრაგნილის მიერ დაკავებულ q ღრმულთა რიცხვზე და მეზობლად მდებარე ღრმულებს შორის α კუთხეზე. q -ს გაზრდით ერთი და იგივე რკალის წრეხაზზე კუთხე α მცირდება და ზღვარში ნულს უახლოვდება. მრავალკუთხედის ნაწილი, რომელიც შექმნილია ე. შ. დ.-ის ვექტორების შეკრებით, ასეთ დროს გარდაიქმნება წრეხაზის რკალად. ამ შემთხვევაში გრაგნილს თანაბრად განაწილებული ეწოდება და მისი განაწილების კოეფიციენტი ტოლია (ნახ. 275)

$$k_p = \frac{\text{ქორდა } \overline{oa}}{\text{რკალი } oa} = \frac{2R \sin \frac{\beta}{2}}{\beta \cdot R} = \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\frac{\beta}{2}}. \quad (22,22)$$

აქ β საპოლუსო დანაყოფზე გრაგნილის განაწილების კუთხეა ელექტრულ გრადუსებში (რადიანებში).

თუ გრაგნილი გარდა იმისა, რომ ის განაწილებულია ღრმულებში, შე-

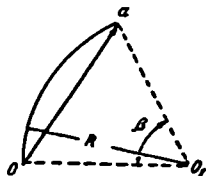
იქავს კოქებს ბიჯის ერთი და იგივე შემოკლებით, მაშინ მისი ე. მ. დ. ტოლია

$$E = 4,44 f \cdot k_p \cdot k_y \cdot q \cdot \omega_1 \cdot \Phi. \quad (22,23)$$

თუ მრავალპოლუსა მანქანაში ყოველი წყვილი პოლუსის კოქები ერთი და იგივე ნაკადთანაა შებმული და აქვს ერთი და იგივე ხვევთა რიცხვი, მაშინ ყველა p წყვილი პოლუსების კოქათა მიმდევრობით შეერთების შემთხვევაში გრაგნილის ე. მ. დ. p -ჯერ მეტია, ვიდრე ორპოლუსა გრაგნილის ე. მ. დ.

თუ გრაგნილი დაყოფილია კოქების a პარალელურ ჯგუფად, მაშინ ე. მ. დ. ის მიღებული მნიშვნელობა უნდა შემცირდეს a -ჯერ, ე. ი.

$$E = 4,44 \cdot f \cdot k_p \cdot k_y \cdot \frac{p \cdot q \cdot \omega_1}{a} \cdot \Phi \quad V. \quad (22,24)$$



ნახ. 275. თანაბრად განაწილებული გრაგნილის რეზულტიური ე. მ. დ.-ის განსაზღვრა.

ნამრავლი $\frac{p \cdot q \cdot \omega_1}{a} = \omega$ ფაზის მიმდევრობით

ბით შეერთებულ ხვევთა რიცხვია.

თუ ერთი წყვილი პოლუსის q კოქა მაგნიტურ არეში დაძრულია სხვა წყვილი პოლუსის ასეთივე q კოქას მიმართ, მაშინ მანქანის ე. მ. დ. მცირდება. ე. მ. დ.-ის ეს შემცირება შეიძლება აღვრიცხოთ გრაგნილის ე. მ. დ. p -ჯერ მეტის კოეფიციენტით (k_1), რომელიც გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტის ანალოგიურად განისაზღვრება.

აღვნიშნათ $k_m = k_p \cdot k_y \cdot k_1$ (22,25) ეწოდება გრაგნილის კოეფიციენტი კერძო შემთხვევაში, როდესაც $k_1 = 1$, $k_m = k_p \cdot k_y$.

ამაგვარად სინუსოიდური არეს შემთხვევაში $2p$ პოლუსა ერთფაზა გრაგნილის ე. მ. დ.-ის ეფექტური მნიშვნელობა ტოლია:

$$E = 4,44 f \cdot k_m \cdot \omega \Phi \quad V. \quad (22,26)$$

ე) მრავალფაზა გრაგნილის ელექტრომაგნიტური ძალა სინუსოიდური არეს შემთხვევაში. მრავალფაზა მანქანებში გრაგნილი ავსებს ღუზის ყველა ღრმულს. თუ ერთ ფაზაზე და პოლუსზე მოდის q ღრმული, მაშინ m ფაზის შემთხვევაში $2p$ პოლუსა მანქანაში ღრმულთა (ან კბილთა) რიცხვი ტოლია

$$Z = 2p \cdot q \cdot m. \quad (22,27)$$

თუ q მთელი რიცხვია, მაშინ ვექტორულ დიაგრამაზე ყველა q ვექტორის დატანის დროს წრეხაზს შემოუვლით p -ჯერ. ვექტორულ დიაგრამას ექნება

$\frac{Z}{p} = 2 \cdot m \cdot q$ სხივი. მაგალითად, სამფაზა გრაგნილისათვის ($m=3$), როდესაც

ღრმულთა რიცხვი პოლუსზე და ფაზაზე $q=2$, ოთხპოლუსა მანქანისათვის ($2p=4$) ვექტორების ვარსკვლავს ექნება 12 სხივი (ნახ. 270.გ).

ზემოთ აღნიშნულის თანახმად ვექტორებს შორის კუთხე ტოლია

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} p = \frac{\pi}{q \cdot m} \quad (22,28)$$

ზემოთ მიღებული (22,21) ფორმულის თანახმად, რომელიც სამართლიანია განსახილველი გრაგნილის ნებისმიერი ფაზისათვის, გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტი ტოლია:

$$k_p = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{2qm}} \quad (22,29)$$

და ფაზის ე. მ. დ.-ის ეფექტური მნიშვნელობა q მთელი რიცხვის შემთხვევაში განისაზღვრება (2,26) ფორმულიდან

$$E = 4,44 f \cdot k_m \cdot \omega \cdot \Phi,$$

სადაც

$$k_m = k_p \cdot k_p.$$

მე-17 ცხრილში მოყვანილი სამუაზა გრაგნილის $k_p = k_{p1}$ მნიშვნელობებში სხვადასხვა მთელი q -სათვის.

თუ q წარმოადგენს პოლუსზე და ფაზაზე ღრმულთა წილად რიცხვს. მაშინ გრაგნილის ე. მ. დ.-ის გამოთვლისათვის შეიძლება ავაგოთ ღრმულთა ვარსკვლავი და მის მიხედვით გრაფიკულად განესაზღვროთ გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტი, როგორც ერთი ფაზის აქტიური მხარეების ე. მ. დ.-ების ვექტორთა გეომეტრიული ჯამის შეფარდება ამავ ე. მ. დ.-ების არითმეტიკულ ჯამთან. ამ შემთხვევაში ფაზის ე. მ. დ. ეფექტური მნიშვნელობა ასევე (22,26) განტოლებით გამოითვლება, თუ მასში ჩაუშვებთ, რომ კოეფიციენტი k_m გრაფიკულად განსაზღვრული განაწილების კოეფიციენტის ტოლია.

გ) გრაგნილის ელექტრომაგნიტური ძალა ნებისმიერი არეს შემთხვევაში. არასინუსოიდური არეს შემთხვევაში გრაგნილში აღძრული ე. მ. დ.-ის ანგარიშისათვის მაგნიტური ინდუქციის მრუდს შლიან ფურიეს მწკრივის მიხედვით ძირითადი და უმაღლესი რიგის კენტ პარმონიკებად¹.

ცხრილი 17

გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტები არეს ძირითადი (k_{p1}) და უმაღლესი რიგის პარმონიკებათათვის (აბსოლუტური მნიშვნელობები)

q	k_{p1}	k_{p2}	k_{p3}	k_{p7}	k_{p9}	k_{p11}	k_{p13}
2	0,966	0,707	0,259	0,259	0,707	0,966	0,966
3	1,960	0,667	0,217	0,177	0,333	0,177	0,217
4	1,958	0,654	0,205	0,158	0,270	0,126	0,126
5	0,957	0,646	0,200	0,149	0,247	0,110	0,102
6	0,957	0,644	0,197	0,145	0,236	0,102	0,092
7	0,957	0,642	0,195	0,143	0,229	0,097	0, 86
8	0,956	0,641	0,194	0,141	0,225	0,095	0,083
9	0,955	0,640	0,194	0,140	0,222	0,093	0,081
10	0,955	0,639	0,193	0,140	0,220	0,092	0,079
∞	0,955	0,637	0,191	0,136	0,212	0,087	0,073

¹ ჩრდილოეთ და სამხრეთ პოლუსების ქვეშ არეს სიმეტრიულობის გამო ე. მ. დ.-ის მრ უღში წვეილი პარმონიკები არა გვაქვს.

არეს ძირითადი ჰარმონიკის მიერ დაინდუქტირებული ე. მ. დ.-ის გამოთვლა ხდება (22,26) ფორმულის მიხედვით. უმაღლესი რიგის ე. მ. დ.-ები გამოითვლება ანალოგიური ფორმულით.

$$E_{\nu} = 4,44 \cdot f_{\nu} \cdot k_{\nu\nu} \cdot \omega \cdot \Phi_{\nu} \quad (22,30)$$

აქ $f_{\nu} = \nu \cdot f$ არეს ν რიგის ჰარმონიკის სიხშირეა. $k_{\nu\nu} = k_{p\nu} \cdot k_{q\nu}$ — ν რიგის ჰარმონიკის გრაგნილის კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება იგივე ჰარმონიკის $k_{p\nu}$ განაწილებისა და $k_{q\nu}$ შემოკლების კოეფიციენტებით. Φ_{ν} რიგის ჰარმონიკის მაგნიტური ნაკადის მაქსიმალური მნიშვნელობაა.

უმაღლესი რიგის ჰარმონიკებისათვის გრაგნილის კოეფიციენტების გამოთვლის დროს მხედველობაში უნდა გვექნოდეს, რომ არეს პირველი რიგის ჰარმონიკის საპოლუსო დანაყოფს შეესაბამება მესამე რიგის ჰარმონიკის სამი საპოლუსო დანაყოფი, მეხუთე რიგის ჰარმონიკის, ხუთი საპოლუსო დანაყოფი და ა. შ. (ნახ. 276). ამიტომ ძირითადი ჰარმონიკის არეში ერთმანეთის მიმართ α ელექტრული გრადუსით დაძრული ორი კოქა შესამე რიგის ჰარმონიკის არეში აღმოჩნდება, 3α ელექტრული გრადუსით დაძრული და $\nu\alpha$ კუთხით ν რიგის ჰარმონიკის არეში. ამავე კუთხით იქნება დაძრული ამ კოქებში არეს შესაბამისი ჰარმონიკით დაინდუქტირებული ე. მ. დ.-ები. მაშასადამე, ν რიგის ჰარმონიკის გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტი (22,21)-ის შესაბამისად ტოლი იქნება:

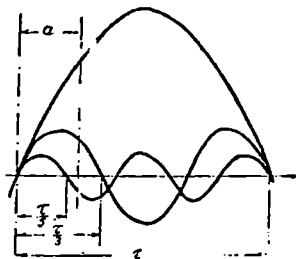
$$k_{p\nu} = \frac{\sin q \frac{\nu\alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu\alpha}{2}}, \quad (22,31)$$

სადაც α — კუთხეა მეზობელ ღრმულებს შორის ძირითადი ჰარმონიკის ელექტრულ გრადუსებში. იმ შემთხვევაში როდესაც $q \rightarrow \infty$

$$k_{p\nu} = \frac{\sin \frac{\nu\beta}{2}}{\frac{\nu\beta}{2}},$$

სადაც β თანაბრად განაწილებულ გრაგნილის საპოლუსო დანაყოფზე განაწილების კუთხეა, გამოსახული პირველი ჰარმონიკის ელექტრულ გრადუსებში (რადიანებში) $k_{p\nu}$ -ის მნიშვნელობა სამეთაზა გრაგნილისათვის q -ს მთელი რიცხვის დროს მოყვანილია ცხრილში 17.

თუ გრაგნილის ბიჯის შემოკლება არეს ძირითადი ჰარმონიკის ელექტრული გრადუსის ტოლია, მაშინ ν რიგის ჰარმონიკისათვის ეს კუთხე $\nu\alpha$ ელექტრულ



ნახ. 276.

გრადუსს შეადგენს. მაშასადამე, ბიჯის შემოკლების კოეფიციენტი არის ν რიგის ჰარმონიკისათვის (22,18)-ის შესაბამისად ტოლი იქნება:

$$k_{\nu} = \sin \frac{\nu \gamma}{2} = \cos \frac{\nu \varepsilon}{2}, \quad (22,32)$$

სადაც $\gamma = \frac{y}{\tau} \pi$;

ძირითადი ჰარმონიკის მაგნიტური ნაკადის ანალოგიურად ν რიგის ჰარმონიკის მაგნიტური ნაკადი ამავე ჰარმონიკის ერთ საპოლუსო დანაყოფზე ტოლია:

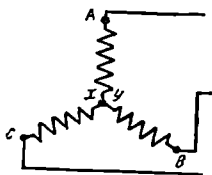
$$\langle \Phi \rangle_{\nu} = B_{cp\nu} \cdot l \cdot \frac{\tau}{\nu} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{max\nu} \cdot l \cdot \frac{\tau}{\nu}, \quad (22,33)$$

რადგანაც სინუსოიდისათვის $\frac{B_{cp\nu}}{B_{max\nu}} = \frac{2}{\pi}$.

განვსაზღვრავთ რა (22,30) განტოლების მიხედვით ყოველი ჰარმონიკის ე. მ. დ.-ის E_1, E_2, \dots, E_{ν} ეფექტურ მნიშვნელობას, მივიღებთ ერთი ფაზის რეზულტიურ ე. მ. დ.-ის ეფექტურ მნიშვნელობას.

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_{\nu}^2}. \quad (22,34)$$

ზ) სამფაზა გრაგნილის შეერთება ვარსკვლავად და სამკუთხედად. სამფაზა გრაგნილის ვარსკვლავად შეერთება ხორციელდება სამივე ფაზის ბოლოების (ან დასაწყისების) შეერთებით ერთ საერთო წერტილში, რომელსაც გრაგნილის ნულოვანი წერტილი ეწოდება (ნახ. 277). გრაგნილის სამი დარჩენილი ბოლო უერთდება მანქანის მომკერებს.

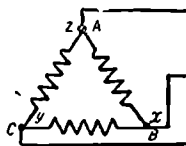


ნახ. 277.

გრაგნილების სამკუთხედად შეერთებისათვის პირველი ფაზის ბოლოს (ან დასაწყისს) მიუერთებენ მეორე ფაზის დასაწყისს (ან ბოლოს), მეორე ფაზის ბოლოს—მესამეს დასაწყისს და ა. შ., რის შედეგადაც იქმნება შეკრული წრედი (ნახ. 278).

ფაზების შეერთების ადგილები გამოიყვანება მანქანის მომკერებთან.

არასინუსოიდური არის საერთო შემთხვევაში სამფაზა გრაგნილის ერთი ფაზის ე. მ. დ. (ე. წ. ფაზური ე. მ. დ.) შეიძლება ვიპოვოთ (22,34) განტოლების მიხედვით. ხაზური (ფაზათაშორის) ძაბვის განსაზღვრისათვის ე. მ. დ.-ის დაღებით მიმართულებად მივიღოთ მიმართულება ფაზის დასაწყისიდან ბოლოსაკენ. მაშინ ფაზების ვარსკვლავად შეერთების შემთხვევაში ხაზური (ფაზათაშორის) ძაბვა გრაგნილის ორი ფაზის ფაზური ძაბვების (ე. მ. დ.) გეომეტრიული სხვაობის ტოლი იქნება, რადგან ფაზები შემხვედრადია ჩართული (ნახ. 279).



ნახ. 278.

$$\dot{E}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B. \quad (22,35)$$

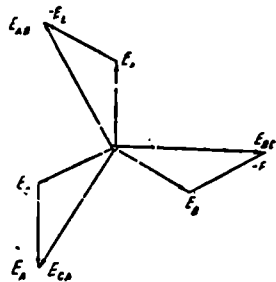
ძირითადი ჰარმონიკისათვის ეს სხვაობა შეადგენს

$$\dot{E}_A = 2 \dot{E}_B \cos 30^\circ = \sqrt{3} \dot{E}_B.$$

ენიდან პირველი ჰარმონიკების ე. მ. დ.-ების 120° -ის ძერას შეესაბამება შესაბამისი ჰარმონიკების ე. მ. დ.-ების ძერა $3 \times 120 = 360$ ელექტრული გრადუსით, ამიტომ შესაბამისი ჰარმონიკების ე. მ. დ.-ების გეომეტრიული სხვაობა ნულის ტოლი იქნება. ცხადია, რომ ყველა სამის ჯერადი ჰარმონიკები სპობენ ერთმანეთს და ამიტომ სამფაზა გრაგნილის ვარსკვლავად შეერთების შემთხვევაში ხაზური ძაბვის მრუდში არ გვექნება სამის ჯერადი ჰარმონიკი.

რაც შეეხება დანარჩენ სამის არაჯერად ჰარმონიკებს, როგორც აღვნიშნეთ შესაძინევი, მათი ფაზური ე. მ. დ. ერთმანეთის მიმართ დროის მიხედვით დაძრულია 120 ელექტრული გრადუსით, ანუ შესაბამისი ჰარმონიკის $1/3$ პერიოდით. ამიტომ ნებისმიერი ამ ჰარმონიკის ე. მ. დ.-ის მიერ შექმნილი ხაზური ძაბვა ძირითადი ჰარმონიკის მსგავსად 3 -ჯერ მეტია თავის ფაზურ ძაბვაზე, ე. ი. $E_{V\lambda} = \sqrt{3} E_{V\phi}$.

უნდა აღინიშნოს განსხვავება უმაღლესი ჰარმონიკების ფაზური ე. მ. დ.-ების მიმდევრობაში. მეხუთე ჰარმონიკისათვის ორი მეზობელი ფაზის ე. მ. დ.-ებს შორის ძერა შეადგენს $5 \times 120 = 600$ ელექტრულ გრადუსს, რაც შეესაბამება $600 - 360 = 240^\circ$ -ით ძერას. ამიტომ მეხუთე ჰარმონიკის ფაზური ე. მ. დ.-ების ვექტორების მიმდევრობა პირველი ჰარმონიკის ფაზური ე. მ. დ.-ების მიმდევრობის საწინააღმდეგო იქნება. მეშვიდე ჰარმონიკისათვის მივიღებთ ძერას, რომელიც ტოლია $7 \times 120 = 840$ ელექტრული გრადუსის, რაც შეესაბამება $840 - 2 \cdot 360 = 120^\circ$. ამიტომ მეშვიდე და პირველი ჰარმონიკებისათვის ფაზების თანმიმდევრობა იქნება ერთნაირი (ნახ. 280).



ნახ. 279. გრაგნილის ხაზური ე. მ. დ. განსაზღვრისათვის შეიძლება დავადგინოთ შემდეგი წესი: უმაღლესი რიგის ჰარმონიკები, რომელთა რიგითი ნომრის სამზე გაყოფა ნაშთში 1-ს გვაძლევს, ისეთივე მიმდევრობისაა, როგორც ძირითადი ჰარმონიკა. ფაზათა მიმდევრობა იცვლება საწინააღმდეგოდ, თუ ნაშთში რჩება 2. ვარსკვლავად შეერთებული სამფაზა გრაგნილის ხაზური ე. მ. დ.-ის მრუდის ფორმა სამი ჯერადი უმაღლესი ჰარმონიკების მოსპობის გამო განსხვავებულია ფაზური ე. მ. დ.-ის მრუდის ფორმისაგან.

ფაზური ე. მ. დ.-ების მიმდევრობის განსაზღვრისათვის შეიძლება დავადგინოთ შემდეგი წესი: უმაღლესი რიგის ჰარმონიკები, რომელთა რიგითი ნომრის სამზე გაყოფა ნაშთში 1-ს გვაძლევს, ისეთივე მიმდევრობისაა, როგორც ძირითადი ჰარმონიკა. ფაზათა მიმდევრობა იცვლება საწინააღმდეგოდ, თუ ნაშთში რჩება 2. ვარსკვლავად შეერთებული სამფაზა გრაგნილის ხაზური ე. მ. დ.-ის მრუდის ფორმა სამი ჯერადი უმაღლესი ჰარმონიკების მოსპობის გამო განსხვავებულია ფაზური ე. მ. დ.-ის მრუდის ფორმისაგან.

ხაზური ე. მ. დ.-ის ეფექტური მნიშვნელობა ტოლი იქნება:

$$E_2 = \sqrt{E_{1\lambda}^2 + E_{5\lambda}^2 + E_{7\lambda}^2 + \dots} = \sqrt{3} \sqrt{E_{1\phi}^2 + E_{5\phi}^2 + E_{7\phi}^2 + \dots} \quad (22,36)$$

ამ განტოლებიდან გამომდინარეობს, რომ არა სინუსოიდური არეს შემ-

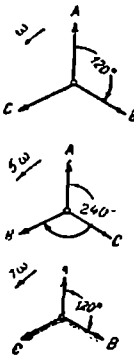
თხვევაში ხაზური და ფაზური ე. მ. ძ-ების ეფექტური მნიშვნელობების შეფარდება ნაკლებია $\sqrt{3}$ -ზე და ტოლია

$$\frac{E_{\Sigma}}{E_{\Phi}} = \sqrt{3} \sqrt{\frac{E_1^2 \phi + E_2^2 \phi + \dots}{j_1^2 \phi + E_2^2 \phi + E_3^2 \phi + \dots}} \quad (22,37)$$

სამკუთხედად შეერთებულ სამფაზა გრაგნილში ხაზური და ფაზური ე. მ. ძ-ები ერთმანეთის ტოლია:

$$E_{\Sigma} = E_{\Phi}$$

გრაგნილის სამკუთხედად შეერთების დროს ფაზები ჰქმნიან რა ჩაკეტილ წრედს, შეერთებულია მიმდევრობით და თანხდენილად. ამ შემთხვევაში გრაგნილში მიმდინარეობს მხოლოდ მესამე და სამის ჯერადი ჰარმონიკების ე. მ. ძ-ებით გამოწვეულ დენები, რადგან მათთვის გრაგნილი მოკლედაა ჩაკეტილი, მაგრამ ამ დროს შექმნილი ძაბვის ვარდნა აკომპენსირებს ამ ე. მ. ძ-ებს და მანქანის ძაბვის მრუდში უკანასკნელნი აღარ გვექნება. მესამე ჰარმონიკის დენების არსებობა, რომლებიც ზოგჯერ დიდ მნიშვნელობას აღწევენ, ზრდის მანქანის დანაჯარგებს და გახურებას, რის გამო სამფაზა გრაგნილის სამკუთხედად ჩართვის ერიღებინ.



თ) უმაღლესი რიგის ჰარმონიკები ე. მ. ძ-ის მრუდში:

ხვევის ე. მ. ძ-ის არასინუსოიდურობა გაპირობებულია ხვევის შიგნით გამავალი მაგნიტური ნაკადის დროის მიხედვით არასინუსოიდური ცვლებადობით. სინქრონული და ასინქრონული მანქანის მაგნიტური არეები იქმნება სხვადასხვაგვარად, ამიტომ უმაღლესი რიგის ჰარმონიკების მიერ ე. მ. ძ-ის მრუდის დამახინჯებას ამ მანქანებში სხვადასხვაგვარი ხასიათი აქვს.

ნაშ. 280. ძირითადი და უმაღლესი ჰარმონიკების ფაზური ე. მ. ძ. ვექტორული დიაგრამები.

განვიხილოთ უმათავრესად, ე. მ. ძ-ის უმაღლესი რიგის ჰარმონიკები სინქრონული მანქანებისათვის. სინქრონულ

გენერატორებში, როგორც ცვლადი ენერჯიის წყაროებში, მეტად მნიშვნელოვანია გვერდის ე. მ. ძ-ის მრუდის სინუსოიდური ფორმა¹.

ე. მ. ძ-ის მრუდის ფორმის დამახინჯების თავისებურებას ასინქრონულ მანქანებში შეეხებებით ცალკე.

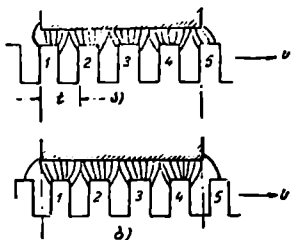
სინქრონულ მანქანებში უქმი სვლის დროს ერთი გამტარის ან დიამეტრული ბიჯიანი ხვევის ე. მ. ძ-ის მრუდი საჰაერო ღრეჩოს გასწვრივ მაგნიტური არეს განაწილების მრუდის მსგავსია. მაგნიტური არეს მრუდში არსებული ყველა უმაღლესი რიგის ჰარმონიკები გამტარის ან დიამეტრული ბიჯიანი ხვევის ე. მ. ძ-ის მრუდში შევა იმავე პროცენტული ფარდობით. არეს მრუდის ჰარმონიკებს სივრცული ჰარმონიკები ეწოდება, რადგანაც ამ ჰარმონიკების ინდუქციის განაწილება სივრცული კოორდინატების ფუნქციაა და არ აისის დამოკიდებული დროისაგან. სივრცული ჰარმონიკები რჩება რა პოლუ-

¹. ГОСТ 20020 თანახმად ე. მ. ძ. მრუდი ითვლება პრაქტიკულად სინუსოიდურად, თუ მისი არც ერთი ორდინატა არ განსხვავდება ძირითადი ჰარმონიკის შესაბამისი ორდინატისაგან მეტად, ვიდრე უკანასკნელის ამპლიტუდის 5%.

სების მიმართ უძრავად და უცვლელი, პოლუსების ბრუნვის დროს ლუზის გამტარში აღძრავს ე. მ. ძ.-ის უმაღლეს ჰარმონიკებს.

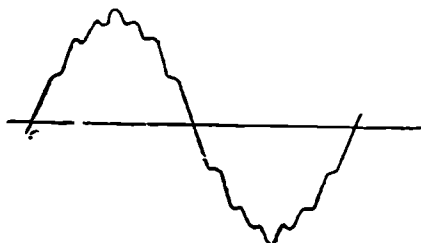
ე. მ. ძ. მრუდის დამახინჯებას სიერკული ჰარმონიკების გარდა იწვევს მაგნიტური არეს პულსაცია, რომელსაც ადგილი აქვს სტატორის კბილოვანი აღნაგობის გამო. კბილების ფარდობითი გადაადგილების დროს საპაერო ღრეჩოს მაგნიტური გამტარობა განუწყვეტლივ იცვლება და იწვევს გრაგნილის მაგნიტური ნაკადუმების რიცხვის ცვლილებას მაქსიმუმიდან რალაც მინიმუმამდე.

როგორც ნახ. 281-დან ჩანს, კბილების ა მდგომარეობიდან ბ მდგომა-



ნახ. 281.

კბილების მდებარეობის მიხედვით მაგნიტური არეს განაწილება საპაერო ღრეჩოში.



ნახ. 282.

სინქრონული მანქანის ე. მ. ძ. ოსცილოგრამა არეს საკბილო ჰარმონიკების არსებობის გამო.

რეობაში გადასვლის დროს იცვლება საპაერო ღრეჩოში არეს გამტარობა დამისი კონფიგურაცია. არეს პულსაცია მით უფრო ძლიერია, რაც უფრო ნაკლებია საპაერო ღრეჩოს ზომა საკბილო ბიჯთან შედარებით. არეს რყევის ერთი პერიოდი შეესაბამება როტორის გადაადგილებას ერთი საკბილო დანაყოფით (1) (ნახ. 281). ერთი ბრუნვის დროს როტორი გადის $2pqm$ ბიჯს, ხოლო წამში $\frac{2pqm}{60}$. მაშასადამე არეს ფეთქადობის ძირითადი სიხშირე

ტოლია:

$$\frac{2qpmn}{60} = 2qmf. \quad (22,38)$$

არეს პულსაცია გრაგნილში აინდუქტირებს მაღალი სიხშირის ე. მ. ძ.-ს, რომლებსაც ე. მ. ძ.-ის საკბილო ჰარმონიკები ეწოდება. საკბილო ჰარმონიკები დაედება რა ე. მ. ძ.-ის ძირითად ჰარმონიკებს, უკანასკნელს აძლევს კბილოვან ხასიათს (იხ. ნახ. 282).

საკბილო ჰარმონიკებს ეწოდება აგრეთვე დროითი ჰარმონიკები, რადგანაც წარმოიშეება პოლუსის არეს დროის მიხედვით რყევის შედეგად.

ე. მ. ძ.-ის საკბილო ჰარმონიკების სიდიდის აღრიცხვა ძნელია, არეს რყევაზე ადგილობრივი გრიგალური ღენების დამამახინჯებელი მოქმედების და-

რუევის კანონის სირთულის გამო. საკბილო ჰარმონიკები უფრო მკვეთრადაა გამოვლინებული ე. მ. ძ.-ის მრულში, ვიდრე სივრცული. სინქრონული გენერატორების დატვირთვის შემთხვევაში მათი ძაბვის მრულში თავს იჩენს აგრეთვე ლუზის რეაქციით და დატვირთვის ხასიათით გამოწვეული სხვა უმაღლესი ჰარმონიკები. ეს საკითხები უფრო დაწვრილებით იქნება განხილული სინქრონული მანქანების კურსში. გენერატორის ე. მ. ძ.-ის მრულში უმაღლესი ჰარმონიკების და განსაკუთრებით საკბილო ჰარმონიკების არსებობა წარმოადგენს უაღრესად არასასურველ მოვლენას შემდეგი მიზეზების გამო;

1) მაგნიტური არეს საკბილო ჰარმონიკები სტატორის კბილებში იწვევს დანაკარგების გაზრდას გრივალური დენების ხარჯზე, რაც ამცირებს მანქანის — მ. ქ. კ. და ზრდის მის გახურებას;

2) ქსელის ცალკეულ ელემენტებში იქმნება გენერატორის ე. მ. ძ.-ის უმაღლესი რივის ჰარმონიკებით გამოწვეული ძაბვის რეზონანსის შესაძლებლობა;

3) მაღალი სიხშირის დენების ელექტრომაგნიტური ინდუქციის შედეგად შეიძლება შეიქმნას ხელისშემშლელი ხმაურობა ელექტროენერჯის გადამცემაში ხაზების ახლოს და განსაკუთრებით მის გასწვრივ მდებარე სადენიანი კავშირგაბმულობის დანადგარებში.

ასინქრონულ მანქანებში მაგნიტური არე იქმნება ცვლადი დენიანი გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალით. ღრმულეებში გრაგნილების განაწილების გამო არე საჰაერო ღრეჩოში კბილოვანი სახისაა მაშინაც კი, როდესაც დენი სინუსოიდური ფორმისაა. მრუდი შეიძლება დაიშალოს ძირითად და უმაღლეს ჰარმონიკებად. ამ უმაღლეს ჰარმონიკებს გრაგნილის ჰარმონიკები ეწოდება. ასინქრონულ მანქანებში გრაგნილის ჰარმონიკების გარდა სინქრონული მანქანების მსგავსად, ადგილი აქვს საკბილო ჰარმონიკებს. საჰაერო ღრეჩოს გასწვრივ დამამაგნიტებელი ძალების სინუსოიდური განაწილების დროს მაგნიტური მრუდის გაქლენთის შემთხვევაში არეს მრუდი არასინუსოიდური ფორმისაა და მახინჯდება უმთავრესად მესამე რივის ჰარმონიკის წარმოშობის გამო, რომელიც ამცირებს მრუდის ამპლიტუდას (იხ. ნახ. 399). საკბილო და გრაგნილის ჰარმონიკები ვანიცდის ვადაადგილებას არეს ძირითადი ტალღის მიმართ, რის გამო მათ შეიძლება ეწოდოს დროითი ჰარმონიკები. მაგნიტური წრედის გაქლენთის შედეგად წარმოშობილ მესამე და სხვა ჰარმონიკებს, რომლებიც თან მიჰყვება არეს ძირითად ჰარმონიკას, შეიძლება პირობით ეწოდოს სივრცული.

ე) ე. მ. ძ.-ის მრულში უმაღლესი ჰარმონიკების შემცირების საშუალებაა. 1. სივრცული ჰარმონიკების შემცირება. გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ q -ს (ღრმულთა რიცხვი პოლუსზე და ფაზაზე) გადიდებით k_p -ის სრულიდე მცირდება. როგორც მე-17 ცხრილიდან ჩანს q -ს გაზრდა განსაკუთრებით შესაძინე ვავლენას ახდენს უმაღლესი ჰარმონიკების $k_{p\gamma}$ -ზე. k_p შემცირების პროპორციულად მცირდება E_v რივის ჰარმონიკის ე. მ. ძ. ამიტომ გრაგნილის რეზოლტიური ე. მ. ძ.-ის მრუდი q -ს დიდი მნიშენელობებისათვის უფრო ახლოსაა სინუსოიდთან,

ე. ი. ე. მ. ძ.-ის მრუდის ფორმის გაუმჯობესებისათვის, საჭიროა ავიღოთ q -ს დიდი მნიშვნელობა, მაგრამ მხედველობაში უნდა გვქონდეს, რომ q -ს გაზრდით მიიქანა ძვირდება, რადგანაც ამას მიყუევართ მანქანის აქტიური მასალის გამოყენების გაუარესებისაყენ იზოლაციის მოცულობის შეფარდებით გაზრდის გამო და გრაგნილის შესრულებისა და ფოლადის დატვიფრვის სამუშაოთა გაძვირებისაყენ.

მაგრამ, ვინაიდან სივრცული ჰარმონიკები მათი რიგის ზრდასთან ერთად საგრძობლად მცირდება, ამიტომ ე. მ. ძ.-ის მრუდის საჭირო ფორმის მისაღებად საკმარისია მე-3, 5, 7, 9 და 11 ჰარმონიკების მოსპობა. ეს შეიძლება შესრულებული იქნეს q -ს მნიშვნელოვანი გაზრდის გარეშე გრაგნილის ბიჯის შემოკლებისა და მისი ვარსკვლავად შეერთების გზით.

გრაგნილის ბიჯის შემოკლების გავლენას რეზულტირტი ე. მ. ძ.-ის მრუდის ფორმაზე განმარტავს ნახ. 283 და ნახ. 284. ნახ. 283-ზე გამოსახული კოქა, რომლის სიგანე საპოლუსო დანაყოფის (τ) ტოლია (მთლიანი ხაზი). როგორც ნახაზიდან ჩანს, არეს მესამე ჰარმონიკა ხვევის თითოეულ მხარეში აღძრავს სამმაგი სიხშირის E_3 ე. მ. ძ.-ებს, რომლებიც არითმეტიკულად იკრიბება. თუ ბიჯს $1/3$ τ -თი შევამოკლებთ (წყვეტილი ხაზი, ნახ. 283), მაშინ თითოეული აქტიური მხარის ე. მ. ძ. E_3 , რომლებიც ერთმანეთის საწინააღმდეგოდაა მიმართული, ურთიერთს სპობენ. თუ ბიჯის შემოკლება ტოლი იქნება $\frac{1}{5}\tau$, მაშინ, როგორც ნახ. 284 გვიჩვენებს, მოსპობილი იქნება ე. მ.

ძ.-ის მეხუთე ჰარმონიკები (E_5). სათანადოდ შევარჩევთ რა ბიჯის შემოკლებას, შეგვიძლია მოვსპოთ ნებისმიერი სივრცული ჰარმონიკა. ჩვეულებრივად ბიჯის შემოკლება შეადგენს დაახ-

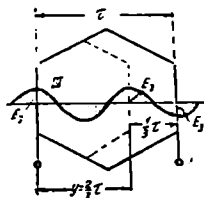
ლოებით $\frac{1}{5}\tau$ ე. ი. ბიჯი $y=0,8\tau$.

მესამე რიგის ჰარმონიკას სპობენ გრაგნილის ვარსკვლავად შეერთებით.

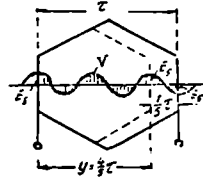
2. დროითი ჰარმონიკების შემცირება. დროითი ჰარმონიკების მოსპობა შეუძლებელია, q -ს გაზრდით ან გრაგნილის ბიჯის შემოკლებით, ვინაიდან ე. მ. ძ.-ების დროითი ჰარმონიკების ფაზა-არ არის დამოკიდებული საპოლუსო დანაყოფის ფარგლებში კოქას აქტიური მხარეების განაწილებაზე.

დროითი ჰარმონიკებს შეიძლება თავი დავალწიოთ არეს პულსაციის მთლიანად მოსპობით, ან სხვადასხვა პოლუსების ქვეშ ამ რყევების 180° -ის დაძვრით.

ამ მიზნებისათვის იხმარება დახრილი (ნახ. 285) საფეხურებიანი პოლუსის ქუსლები (ნახ. 286, 291) ან ღრმულების დახრა მცირე სიმძლავრის მანქანებში (იხ. ნახ. 287).

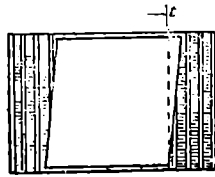


ნახ. 283.

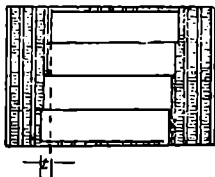


ნახ. 284.

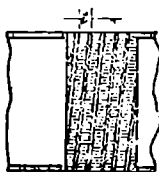
პოლუსის ქუსლების ან ღრმულების დახრას ასრულებენ ერთ საკბილო დანაყოფზე (1), რის გამოც კბილების გადაადგილების დროს არ იცვლება საჭაერო ღრეჩოს მაგნიტური გამტარობა და გრაგნილის ხევეთან შებმული სრული ნაკადი რჩება მუდმივი. დახრის შემთხვევაში მცირდება აგრეთვე სივრცული ჰარმონიკებიც, რადგანაც ყოველი გამტარი მთელ თავის სიგრძეზე



ნახ. 285.



ნახ. 286.



ნახ. 287.

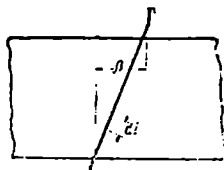
მოთავსებულია სხვადასხვა მაგნიტურ პირობებში და h სიგრძის ცალკეული ელემენტების ე. მ. დ.-ები უნდა შეიკრიბოს გეომეტრიულად.

დახრის გამო ე. მ. დ. შემცირება შეიძლება აღვრიცხოთ, თუ დახრის რკალის ფარგლებში გამტარს განვიხილავთ როგორც თანაბრად განაწილებულ გრაგნილის (ნახ. 288), მაშინ დახრის კოეფიციენტი γ ჰარმონიკისათვის ტოლი იქნება:

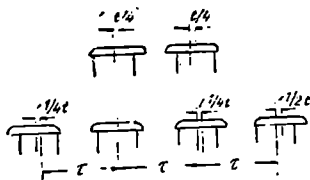
$$k_{cs} = \frac{\sin \frac{\gamma \beta}{2}}{\frac{\gamma \beta}{2}} \quad (22,39)$$

არეს პულსაციის შემცირებას შეიძლება მივალწვიოთ აგრეთვე დახურული ღრმულების საშუალებით.

სინქრონულ მანქანებში პოლუსის ქუსლების დახრის ნაცვლად ზოგჯერ



ნახ. 288.



ნახ. 289.

მიმართავენ პოლუსის ქუსლების დაძვრას წრეხაზზე ერთიმეორის მიმართ $1/2$ საკბილო დანაყოფით.

ნახ. 289-ზე ნაჩვენებია პოლუსის ქუსლების ასეთი დაძვრა ორპოლუსა და ოთხპოლუსა მანქანებისათვის.

საკბილო ჰარმონიკები შეიძლება მნიშვნელოვნად იქნეს შესუსტებული

აგრეთვე პოლუსზე და ფაზაზე ღრმულთა ნაწილადიანი რიცხვის მქონე გრაგნილის გამოყენებათ (ნაწ. III 23, ზ).

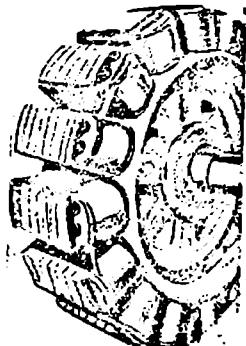
23. ცვლადი ღენის მანქანების გრაგნილები

ა) ხაერთი შენიშვნები. ცვლადი ღენის მანქანას ჩვეულებრივად აქვს ორი ან რამდენიმე გრაგნილი, რომლის ნაწილი მოთავსებულია სტატორზე, ნაწილი კი როტორზე. ცვლადი ღენის მხოლოდ ზოგიერთ სპეციალურ მანქანებში გვაქვს ერთი გრაგნილი, მოთავსებული სტატორზე ან როტორზე. გრაგნილები, რომლებშიც გადის ცვლადი ღენი, როგორც წესი განაწილებულია სტატორის ან როტორის ღრმულებში (ნახ. 290). შემდეგში ჩვენ მათ მოკლედ ეუწოდებთ ცვლადი ღენის გრაგნილებს.

ცვლადი ღენის მანქანის გრაგნილებს, რომლებშიც გადის მუდმივი ღენი და განკუთვნილია მანქანის მაგნიტური ნაკადის შესაქმნელად, შემდეგში აგზნების გრაგნილს ეუწოდებთ.



ნახ. 290.



ნახ. 291.

ეს გრაგნილები მუდმივი ღენის მანქანის აგზნების გრაგნილების ანალოგიურად უმთავრესად შეყურსული სახით სრულდება (ნახ. 291).

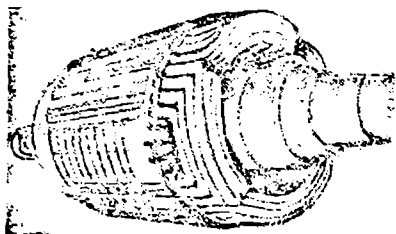
სწრაფმავალ სინქრონულ მანქანებში როტორის სიმეტრიისა და გრაგნილების საიმედო შექანიკური დამაგრების მოსაზრებით აგზნების გრაგნილი განაწილებულია როტორის ღრმულებში.

გრაგნილების მასალად ჩვეულებრივად წითელი ელექტროლიტური სპილენძი იხმარება (იხ. ნაწ. 1 § 6). იყო ცდები ალუმინის გამოყენების შესახებ. მაგრამ მან მასიური გავრცელება ვერ ჰპოვა.

იმიხატვის, რომ თავიდან იქნეს აცილებული მანქანის და გრაგნილების მეტალურ ნაწილებს შორის და აგრეთვე გრაგნილის ცალკეულ ელემენტებს შორის შეხების შესაძლებლობა, საგრაგნილე სპილენძს ამხოლოებენ. იზოლაციად გამოყენებულია სპეციალური საიზოლაციო მასალები—ლაქები (იხ. ნაწ. 1 § 6).

ქვემოთ ძირითადი ყურადღება მიექცევა ცვლადი ღენის გრაგნილებს, ვინაიდან ელექტრული თვალსაზრისით აგზნების გრაგნილები არ არის რთული.

ზემოთ აღნიშნული იყო, რომ ცვლადი დენის გრაგნილები ჩაწყობილია ღრმულეებში, რომლებიც ამოტვირთულია ფოლადის ფურცლებში, ანუ ე. წ. მანქანის თუნუქში. არსებობს ღრმულეების სამი ტიპი: ა) ღია ღრმულეები (ნახ. 293, ა), ბ) ნახევრად დახურული ღრმულეები (ნახ. 293, ბ)

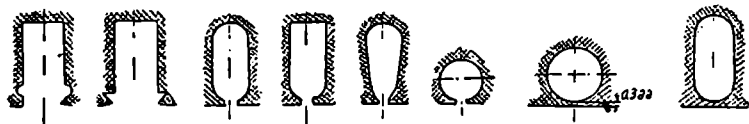


ნახ. 292.

და გ) დახურული ღრმულეები (ნახ. 293, გ).

ნახევრად დახურული და დახურული ღრმულეების შემთხვევაში გრაგნილის გამტარი გაიყრება ღრმულეში მოთავსებულ საიზოლაციო მასრაში. გრაგნილის შესრულების ამ მეთოდს ეწოდება დახვევა გათრევით (ნახ. 294). ნახევრად დახურული ღრმულეების შემთხვევაში გრაგნილი შეიძლება წინასწარ დამზადდეს რბილი კოქების სახით (ნახევრად შაბლონური გრაგნი-

ლი), რომელთა ხვევებიც სათითაოდ ეწყობა ღრმულის კრილით. ასეთ გრაგნილს ჩაყრილი ან ჩასაყრელი გრაგნილი ეწოდება (ნახ. 295).



ნახ. 293, ა.

ნახ. 293, ბ.

ნახ. 293, გ.

ღია ღრმულეების შემთხვევაში გრაგნილის კოქების ჩაწყობა ხდება უკვე მზა გამხოლოებული სახით (ნახ. 296). ამ შემთხვევაში გრაგნილს შაბლონური ეწოდება.

გრაგნილების გამოსახვისათვის იხმარება ე. წ. სქემა-განფენა და ტორსული სქემები. თუ სტატორის ან როტორის ცილინდრული ზედაპირის გამოსახულებას ღრმულეების მხრიდან გავჭრით ცილინდრის ერთ-ერთ მსახველზე და გავშლით სიბრტყედ, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 306, 321 და სხვ., მივიღებთ გაშლილ სქემას.

ყველა გამტარი ნაჩვენებია სწორი ხაზით, იგივე თანმიმდევრობით, როგორცაა განლაგებული სტატორზე ან როტორზე. ერთ-ერთი გრაგნილში ერთი ღრმულის გამტარები გამოისახება ერთი ხაზით, მიუხედავად გამტართა რიცხვისა ღრმულეში. ორდენა გრაგნილში გამტარები ღრმულის



ნახ. 294. კოქისებური გრაგნილის გათრევით დახვევა.

რიგად. ამიტომ ამ გრაგნილის გაშლილ სქემაზე ღრმულის გამტარები გამო-
სახულია გვერდით მდებარე ორი ხაზით (ნახ. 324). ზოგჯერ ეს ორი ხაზი
შეთავსებულია ერთში.

ტორსული სქემა სქემატურად წარმოადგენს სტატორის ან როტორის
განივირის. გრაგნილის გამტარები ნახაზზე გამოსახულია წრეებით ან სწორი
ხაზებით რადიუსის მიმართულებით, შუბლური ნაწილე-
ბი კი სათანადოდ მრუდწირული მონაკვეთებით (ნახ.
305, ბ).

ბ) გრაგნილების კლასიფიკაცია. ცვლადი დენის
მანქანის სიმძლავრის და დანაშნულების მიხედვით არ-
სებობს გრაგნილების შესრულების მრავალი სხვადასხვა
ფორმა. მაგრამ გრაგნილები ერთმანეთისაგან განსხვავ-
დება უმთავრესად კონსტრუქციული თავისებურებით
და ელექტრული თვალსაზრისით შეიძლება დავიყვანოთ
ძირითადი სქემების შედარებით მცირე რიცხვამდე.



ელექტრული მანქანების ისტორიული განვითარე-
ბის შესაბამისად ცვლადი დენის მანქანების გრაგნილე-
ბი შეიძლება დაიყოს სამ ჯგუფად:

ნახ. 295. რბილი სექციე-
ბისაქან შემდგარი კოქისე-
ბური გრაგნილის ჩაწყობა
(ჩაყრილი გრაგნილი).

1) გრაგნილები, რომლებიც გამოიყენება მხოლოდ
ცვლადი დენის მანქანებში: ა) კოქისებური და ბ) ლეროვანი.

2) გრაგნილები, რომლის ტიპები გამოიყენებულია მუდმივი დენის
მანქანებში: ა) გაუქრელი და ბ) გაქრელი.

3) სპეციალური გრაგნილები; მოკლედ
შერთული, პოლუსთა რიცხვის გადარ-
თვით და ა. შ.



ნახ. 296. კოქისებური შაბლო-
ნური გრაგნილების ჩაწყობა.

ამჟამად ორფენა შესრულების კოქისებური
და ლეროვანი გრაგნილები არაფრით არ განსხვავ-
დება მუდმივი დენის გაქრელი გრაგნილებისაგან.
მუდმივი დენის უცვლელი გრაგნილები გამოიყე-
ნება მხოლოდ ერთლუზა გარდამსახებში და
ცვლადი დენის კოლექტორულ მანქანებში. მათ
ამ თავში არ განვიხილავთ. ამიტომ ცვლადი დენის
ყველა არსებული გრაგნილი შეიძლება დაყოთ
შემდეგ სამ ძირითად ჯგუფად: 1) კოქისებური
გრაგნილები, 2) ლეროვანი გრაგნილები, 3) სპე-
ციალური გრაგნილები.

ფაზათა რიცხვის მიხედვით გრაგნილები შე-
იძლება იყოს ერთფაზა და მრავალფაზა.
აღნიშნული დაყოფის გარდა, გრაგნილები იყოფა
რიგი სხვა ნიშნების მიხედვით:

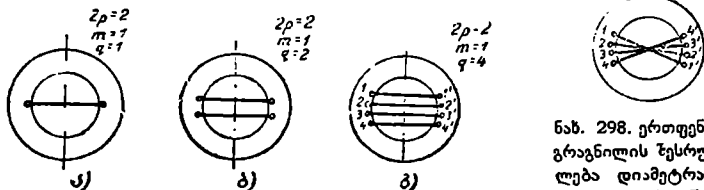
ა) შესრულების ხასიათის მიხედვით—ხელნაკეთი, შაბლონური,
ნახეკრად შაბლონური.

16. ელექტრული მანქანები.

ბ) გრაგნილის განლაგების მიხედვით ღრმულში—ერთფენა და ორფენა.

გ) პოლუსზე და ფაზაზე ღრმულთა რიცხვის მიხედვით გრაგნილები მთელი q -თი (ღრმულთა რიცხვი პოლუსსა და ფაზაზე), გრაგნილები წილადური q -თი.

ამჟამად ყველაზე მეტი გავრცელება ჰპოვა სამფაზა გრაგნილებში ღრმულთა მთელი რიცხვით პოლუსზე და ფაზაზე. ამიტომ ჩვენს მიერ მთავარი ყუ-



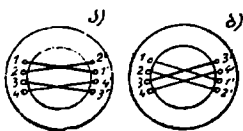
ნახ. 297. ერთფენა გრაგნილის შესრულება.

რადღებამიქცეულია სამფაზა გრაგნილებზე ღრმულთა მთელი რიცხვით პოლუსსა და ფაზაზე, რაც მხედველობაში უნდა გვქონდეს წინამდებარე ნაწილის შესწავლის დროს.

გ) ცვლადი დენის გრაგნილების შექმნის პრინციპი. ცვლადი დენის გრაგნილების შექმნა ყველაზე ადვილად აიხსნება ერთფენა კოქისებური გრაგნილების მაგალითზე. ნახ. 297-ზე სქემატურად ნაჩვენებია ორპოლუსა ერთფაზა დენის მანქანის (ან მრავალფაზა მანქანის ერთი ფაზის) ერთფენა გრაგნილის შექმნა ერთი, ორი და ოთხი ღრმულით პოლუსზე და ფაზაზე.

როდესაც $q=1$, გრაგნილი შედგება ერთი კოქისაგან (ან ხვევისაგან), რომელსაც უქირავს ორი ღრმული, როდესაც $q=4$ კოქთა რიცხვი ოთხამდე იზრდება და გრაგნილს უკავია რვა ღრმული.

წინა თავიდან ცნობილია, რომ გრაგნილის ე. მ. დ. შეიძლება განსაზღვრულ იქნეს, როგორც გრაგნილის შემადგენელი გამტარების ე. მ. დ.-ის გეომეტრიული ჯამი. ცხადია, რომ გამტარების შეერთების მიმდევრობას არა აქვს გავლენა რეზულტიურ ე. მ. დ.-ის მნიშვნელობაზე, ისევე როგორც არ იცვლება გეომეტრიული ჯამი შესაქრები ვექტორების გადანაცვლებით. ნახ. 238-ის მიხედვით დიამეტრალურიბიჯიანი და ნახ. 299-ის მიხედ-



ნახ. 299. შემოკლებულბიჯიანი კოქებით ერთფენა გრაგნილების განხორციელება.

ვით შემოკლებულბიჯიანი კოქების მიმდევრობით შეერთების შემთხვევაში ელექტრომამოძრავებელი ძალა რჩება ისეთივე, როგორც ნახ. 297-ზე ნაჩვენებ კოქების მიმ-

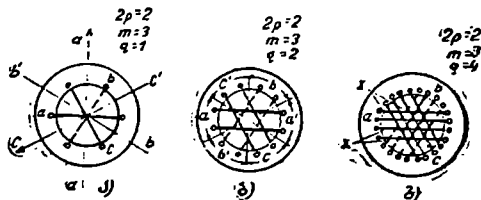
დევრობით შეერთებით მიღებულ გრაგნილში.

სამფაზა გრაგნილის მისაღებად სტატორზე ათავსებენ კიდევ ორ გრაგნილს (ნახ. 300) იმისათვის, რომ ყოველი გრაგნილის ან როგორც ამბობენ

კოველი ფაზის ე. მ. ძ.-ის ეფექტური მნიშვნელობები ერთნაირი იყოს და 120 ელექტრული გრადუსით დაძრული, საჭიროა, რომ ყოველი ფაზის გრაგნილები გამტარების ურთიერთ განლაგების მხრივ იყოს საესებით იდენტური და ჰქონდეს თავის ღერძებს შორის ძვრა 120 ელექტრული გრადუსი. გრაგნილის ღერძი წარმოადგენს ამ გრაგნილის მიერ მასში დენის გავლისას მის გეომეტრიულ ცენტრში შექმნილ არეს ინდუქციის ვექტორის მიმართულებას ($a-a'$ და ა. შ. ნახ. 300,ა)

ნახ. 300, ბ და 300, გ-დან გამომდინარეობს, რომ ორპოლუსა მანქანის სამფაზა გრაგნილის შემთხვევაში, როდესაც q მთელი რიცხვია და სტატორის წრეხაზზე ღრმულები თანაბრადაა განაწილებული, სტატორის წრეხაზი და-

იყოფა ექვს თანაბარ ზონად შემდეგი მიმდევრობით: 1) ზონა a , 2) ზონა c' , 3) ზონა b , 4) ზონა a' , 5) ზონა c , 6) ზონა b' . აქ a , b , c ასოებით აღნიშნულია კოქების მარცხენა (პირდაპირი) მხარეები. ასოებით a' , b' , c' იგივე კოქების მარჯვენა (უკუ) მხარეები. ყველა ზონა შეიცავს q ღრმულს.



ნახ. 300. ერთფაზა სამფაზა გრაგნილის შესრულება.

როგორც ზონების განაწილებიდან ჩანს, ყოველი მომდევნო ფაზის კოქას დასაწყისი დაძრულია წინა ფაზის შესაბამისი კოქას დასაწყისიდან ორი ზონით ანუ ორი q ღრმულით. $2p$ პოლუსის შემთხვევაში ზონათა რიცხვი, p -ჯერ გაიზრდება. m ფაზა გრაგნილისათვის ზონათა რიცხვი ერთ წყვილ პოლუსზე შეადგენს $2m$. ზოგად შემთხვევაში სტატორის წრეხაზი დაიყოფა $2pq$ თანაბარ ზონად, q ღრმულით თითოეულ მათგანში (ღრმულების ან კბილების სრული რიცხვი შეადგენს

$$Z = 2p \cdot m \cdot q$$

ნახ. 300-ზე ნაჩვენებ სამფაზა გრაგნილის ერთი ფაზის რეზულტიური ე. მ. ძ. ისევე როგორც ერთფაზა გრაგნილისათვის არაა დამოკიდებული გამტარების შეერთების მიმდევრობაზე და დიამეტრალური ბიჯიანი q კოქას ე. მ. ძ.-ის გეომეტრიული ჯამის ტოლია. m ფაზა გრაგნილის ბიჯის დიამეტრალობის საერთო ნიშანს, თუ გრაგნილი ავსებს ყველა ღრმულს, წარმოადგენს ერთ საპოლუსო დანაყოფზე m ზონის არსებობა, რომელთაგან ყოველი ზონა იქერს საპოლუსო დანაყოფის $\frac{1}{m}$ ნაწილს, და შევსებულია ერთი ფაზის გამტარებით (მეზობელი ფაზების გამტარების შერევის გარეშე).

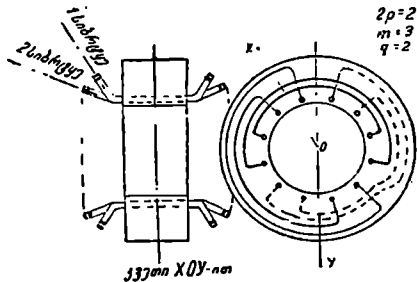
ღ) კოქისებური გრაგნილი არაერთნაირი ფორმის კოქებით. განსახილველი კოქისებური გრაგნილები ერთფენაა დიამეტრალური ბიჯით და შედგება ჩვეულებრივად მრგვალი კვეთის განმხოლოებულ გამტარისაგან შესრულებულ კოქებისაგან, (ნახ. 301). კოქისებური გრაგნილები გამოიყენება

ასინქრონული ძრავების და სინქრონული მანქანების სტატორებისათვის და ზოგჯერ საკონტაქტო რგოლებიანი ასინქრონული ძრავების როტორებისათვის. მთელი q -ს შემთხვევაში კოქისებური სამთაზა გრაგნილის შექმნის პრინციპი სქემატურად განხილული იყო 297 და 300 ნახაზებზე, სადაც გრაგნილების შუბლური შეერთებები თვალსაჩინოებისათვის გამოსახულია სტატორის შემოჩარხვის განივად. სინამდვილეში შუბლური შეერთებები გადალუნულია ისეთ-ნაირად, რომ დარჩეს თავისუფალი ადგილი მანქანის შიგა ნაწილისათვის.

სამთაზა კოქისებური გრაგნილებისათვის არაერთ-



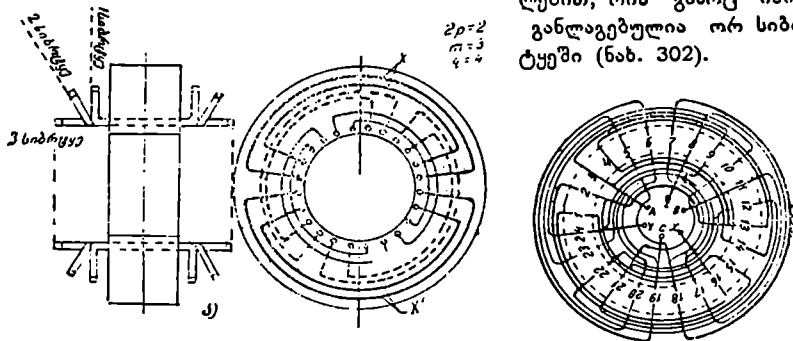
ნახ. 301. კოქისებური გრაგნილის სექცია (კოქა).



ნახ. 302. ორსიბრტყა გრაგნილი (როდესაც $p=1$).

ნაირი კოქებით არჩევენ შუბლური შეერთებების შესრულების ორ ძირითად ფორმას: 1) ორსიბრტყა გრაგნილი; 2) სამსიბრტყა გრაგნილი.

ორსიბრტყა გრაგნილში შუბლური ნაწილები შეიქმნება კოქების მთელი ჯგუფის (ნახ. 300, ბ; $q=2$) გადალუნვით სტატორის ვარე წრეხაზის მიმართულებით, რის გამოც ისინი განლაგებულია ორ სიბრტყეში (ნახ. 302).



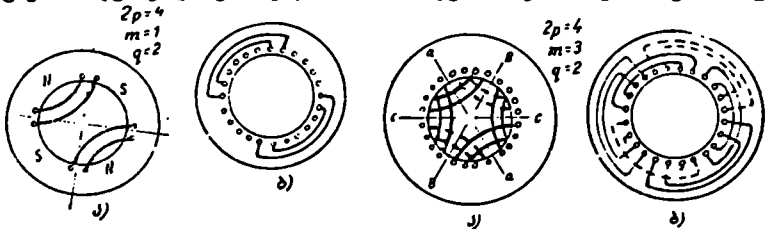
ნახ. 303. სამსიბრტყა გრაგნილი (როდესაც $p=1$).

სამსიბრტყა გრაგნილის შექმნისათვის q კოქების ნახევარი გადალუნულია ერთ მხარეს, მეორე ნახევარი მეორე მხარეს (ნახ. 303).

ამ შემთხვევაში შუბლური შეერთებები განლაგდება სამ სიბრტყეში,

როდესაც q კენტი რიცხვია და ერთ მხარეს გადაიღუნება $\frac{q+1}{2}$ კოქა, ხოლო მეორე მხარეს $\frac{q-1}{2}$ კოქა.

1. ორსიბრტყეა გრაგნილი. განვიხილოთ ოთხპოლუსა მანქანის გრაგნილის შექმნა. ნახ. 304, ა-ზე სქემატურად გამოსახულია გრაგნილის ერთი ფაზის კოქების ორი ჯგუფი, იმ შემთხვევაში, როდესაც ღრმულთა რიცხვი პოლუსზე და ფაზაზე $q=2$. ოთხპოლუსა მანქანაში ერთი ფაზის შუბ-

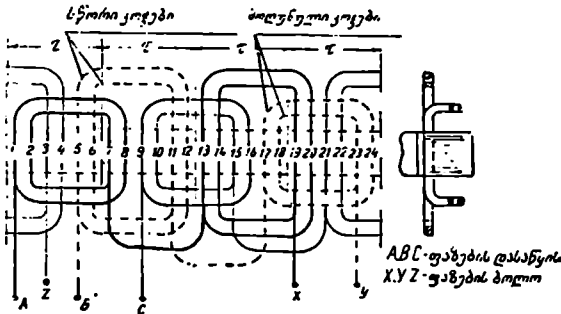


ნახ. 304.

ნახ. 305.

ლური შეერთების გადაღუნვა ხდება ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 304-ზე. ყველა სამი ფაზის შუბლური შეერთებებისათვის შესაბამისად მივიღებთ ნახ. 305, ა და 305, ბ.

გრაგნილის სქემა-განფენა წარმოდგენილია ნახ. 306-ზე. გრაგნილი გამოიყენება ნახევრად დახურულ და ღია ღრმულების შემთხვევაში. პირველ



ნახ. 306. ორსიბრტყეა გრაგნილის სქემა-განფენა ($m=3, 2p=4, q=2$).

შემთხვევაში ის ჩვეულებრივად სრულდება გათრევის მეთოდით. კოქები განსხვავებული ფორმისაა. q კოქა ჰქმნის ერთ ჯგუფს შუბლური შეერთებების ერთნაირი ფორმით. როგორც სამფაზა კოქისებური გრაგნილის შექმნის პრინციპიდან გამომდინარეობს, ერთ წყვილ პოლუსზე მოდის კოქების სამი ასეთი

ჯგუფი (ფაზათა რიცხვის მიხედვით), p წველ პოლუსზე კი $3p$ ჯგუფი. საერთო შემთხვევაში m ფაზისა და $2p$ პოლუსისათვის ჯგუფების რიცხვი K შეადგენს:

$$K = m \cdot p$$

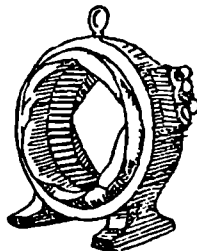
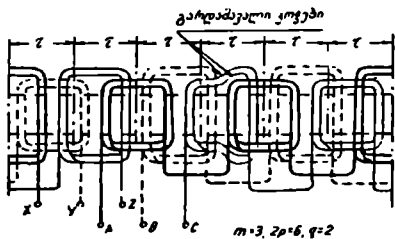
მაშასადამე, როდესაც p წვეილი რიცხვია, ორსიბრტყა გრაგნილში კოქების ნახევარი სწორია, ნახევარი კი გადაღუნული (ნახ. 306 და 307). როდესაც p კენტია, კოქების საერთო რიცხვიც კენტი იქნება და სწორი და გადაღუნული კოქების გარდა მივიღებთ ერთ გარდამავალ კოქას.



რომლის შუბლური შეერთებები განლაგებულია ორ სიბრტყეში. ნახ. 308-ზე მოყვანილია ორსიბრტყა გრაგნილის სქემა-განფენა $p=3$ შემთხვევაში, ნახ. 309-ზე ნაჩვენებია ასეთი გრაგნილის არე ხედი გარდამავალი კოქათი. გარდამავალი კოქას არსებობა არასასურველია, როგორც გრაგ-

ნახ. 307. ორსიბრტყა გრაგნილი, ნილის რემონტისა და წარმოების თვალსაზრისით, როდესაც p წვეილია ($p=2, q=6$). ისე ჯგუფებს შორის სიმეტრიულობის დარღვევის გამოც. ეს ხელისშემშლელია ჯგუფების პარალელური შეერთებისათვის, რისგამოც ერიდებიან წვეილპოლუსთა კენტ რიცხვს. როდესაც $p > 7$, ასეთი შეზღუდვა არ წარმოადგენს დიდ უხერხულობას, რადგანაც უახლოეს წვეილ p -ზე გადასვლისას მანქანის ბრუნვის სიჩქარის ფარდობითი სხვაობა მცირეა.

ერთი ფაზის კოქების პარალელური შეერთებისათვის, რასაც მიმართავენ დიდი ღენების შემთხვევაში, მანქანის დატვირთვის დროს გამათანასწორებელი ღენების თავიდან ასაცილებლად აუცილებელია, ერთის მხრივ, გვექონდეს ძირითადი ნაკადით დაინდუქტირებული ტოლი ე. მ. ძ.-ები და მეორე მხრივ ჯგუფების ინდუქტიური და აქტიური წინააღმდეგობების ტოლობა.



ნახ. 308. ორსიბრტყა გრაგნილის სქემა-განფენა (როდესაც p კენტია).

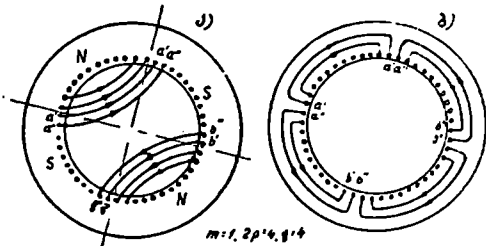
ნახ. 309. ორსიბრტყა გრაგნილი, როდესაც p კენტია ($p=3; q=4$).

ორსიბრტყა გრაგნილში კოქების სხვადასხვა ფორმის გამო მეორე მოთხოვნის შესრულება ზოგჯერ ძნელია, რაც გრაგნილის ნაკლს უნდა მიეკუთვნოს.

ორსიბრტყა გრაგნილი მარტივია წარმოების და განსაკუთრებით რემონტის მხრივ. სწორი კოქას შეკეთება შეიძლება მეზობელი სალი კოქების

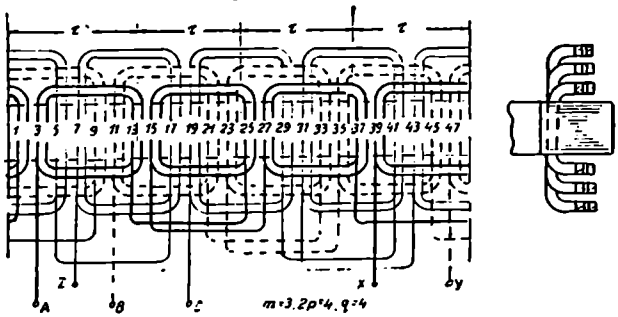
მთლიანობის დაურღვევლად. გრაგნილის ნაქლს წარმოადგენს სპილენძის შედარებით დიდი ხარჯი შუბლურ ნაწილებზე, რადგანაც უკანასკნელი შედარებით გრძელი გამოდის.

2. სამსიბრტყა გრაგნილი. ცვლადი დენის სწრაფმავალ ორპოლუსა მანქანებს ჩვეულებრივად ღრმულთა დიდი რიცხვი აქვთ პოლუსზე და ფაზაზე. ამიტომ ასეთ მანქანებში ორსიბრტყა გრაგნილის გამოყენების შემთხვევაში შუბლური შეერთებები ჯერ ერთი გამოდის მე ჯად გრძელი და, მეორე მხრივ იკავებს დიდ ადგილს მანქანის რადიალური მიმართულებით, ზრდის რა ამით სტატორის ფოლადის ფურცლების გარე დიამეტრს. ამის შედეგად მანქანის ზომები და წონა იზრდება. ამ ნაკლმა მიგვიყვანა იმ აზრამდე, რომ გრაგნილი შესრულდეს შუბლური შეერთებებით სამსიბრტყეში. სამსიბრტყა გრაგნილის შექმნა განვიხილოთ ოთხპოლუსა მანქანისათვის. ნახ. 310-ზე სქემატურად ნაჩვენებია გრაგნილის ერთი ფაზის კოქების ორი ჯგუფი, როდესაც



ნახ. 310.

$q=4$. სამსიბრტყა გრაგნილის მისაღებად კოქების თითოეული ჯგუფი იყოფა ორ ნაწილად. ერთი ნაწილის შუბლური შეერთებები $a'-a'$ და $a''-a''$, და მეორე ნაწილის შეერთებები $b'-b'$ და $b''-b''$ (ნახ. 310, ა) იკრება და შეერთდება ერთმანეთთან ისეთნაირად, რომ დენს გამტარებში ჰქონდეთ პირვანდელი მიმართულება. შემდეგ ხდება გადაღუნვა შუბლური შეერთებებისა,

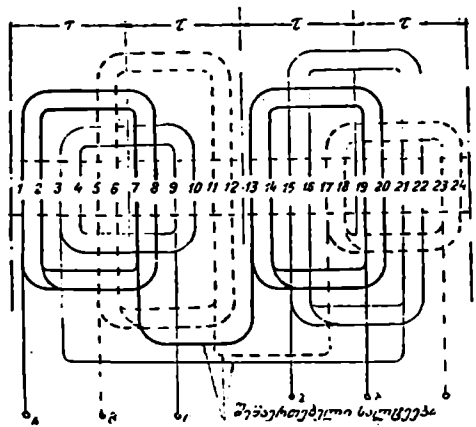


ნახ 311. სამსიბრტყა გრაგნილის სქემა-განფენა.

რომელთა ჯგუფების რიცხვი ორკეცდება (ნახ. 310, ბ) ორსიბრტყა გრაგნილთან შედარებით.

ნახ. 311-ზე წარმოდგენილია სამფაზა სამსიბრტყა გრაგნილის სქემა-განფენა, როდესაც $2.p=4$; $q=4$.

სამსიბრტყა გრაგნილს აქვს სამი სახის კოკი (ნახ. 303 და 311). შუბლური შეერთებების განაწილება უფრო თანაბარია, ვიდრე ორსიბრტყა გრაგნილში. სამსიბრტყა გრაგნილში ადვილად შეიძლება ერთი ფაზის ჯგუფების პარალელური შეერთება, ვინაიდან ერთი ფაზის კოკების ფორმა ერთნაირია, მეორე მხრივ სხვადასხვა ფაზების კოკების ფორმით განსხვავება განაპირობებს ფაზების არათანაბარ წინააღმდეგობებს, რაც წარმოადგენს სამსიბრტყა გრაგნილის ნაკლს. ამ ნაკლის თავიდან ასაცილებლად შესაძლებელია სამსიბრტყა გრაგნილის შესრულება ტოლი სიგრძის კოკებით, მაგრამ ამით რთულდება გრაგნილის წარმოება. შეკეთების მხრივ სამსიბრტყა გრაგნილი ჩამოუყვარდება ორსიბრტყას, ვინაიდან შიგა კოქას დაზიანების შემთხვევაში საჭიროა დაზიანებული კოკების საგრძნობი ნაწილის დარღვევა.

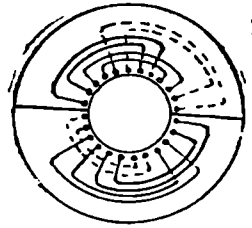


3. სამსიბრტყა გრაგნილი და საშლელი სტატორისათვის. იმისათვის, რომ დიდი სიმძლავრის მანქანებში გვექონდეს სტატორის დაშლის შესაძლებლობა, კოქისებურ გრაგნილს ასრულებენ ნახ. 312 და 313-ის თანახმად. გრაგნილი გაიყოფა ორ ნაწილად, კოკების სამი ჯგუფით, თითოეულ მათგანში ფაზათა რიცხვის შესაბამისად. ზოგად შემთხვევაში სტატორი შეიძლება დაიშა-

ნახ. 312. სამსიბრტყა გრაგნილის სქემა-განფენა და საშლელი სტატორის შემთხვევაში.

ლოს p ნაწილად, სადაც p მანქანის წყვილპოლუსთა რიცხვია. გრაგნილის შუბლური შეერთებები ზოგჯერ ნახ. 314-ის მიხედვით ასრულებს.

დასაშლელი სტატორის სამსიბრტყა გრაგნილის ნაკლად უნდა ჩაითვალოს ფაზათა არაერთნაირი წინააღმდეგობა და შუბლური შეერთებების დიდ მანძილზე გამოშვება, რის გამოც საგრძნობლად იზრდება მანქანის სიგრძე.

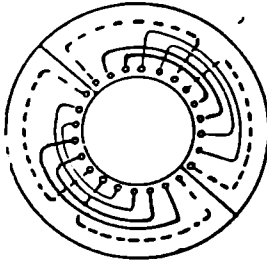


ნახ. 313 დასაშლელი სტატორის სამსიბრტყა გრაგნილის შუბლური ნაწილების შეერთება.

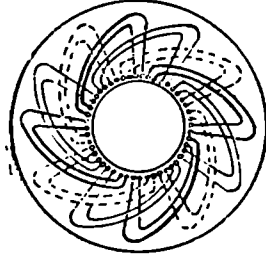
4. ჯაქვეური გრაგნილი. ჯაქვეური გრაგნილი წარმოადგენს შუალედ ტიპს არაერთნაირკოკებიან და ტოლსიქვიან გრაგნილებს შორის. ნახ. 315 და 316-ზე გამოსახულია სამფაზა ჯაქვეური გრაგნილის სქემა-განფენა და მისი შუბლური ნაწილების სქემა იმ შემთხვევაში, როდესაც $2p=4$ და $q=4$. ჯაქვეური გრაგნილი მიიღება ნახ. 311-ზე ნაჩვენებ სამსიბრტყა გრაგნილისაგან შუბლური შეერთებების სათანადო სახეცვლილებე-

ბით. ჯაქვეური გრაგნილი შედგება ერთნაირი ფორმის კოკათა ჯგუფებისაგან. ამის გამო ჯაქვეურ გრაგნილში ადვილია პარალელური წრედების შექმნა.

ე) ტოლსეკციანი კოკისებური გრაგნილები (ერთნაირი ფორმის კოკე-ბით). ტოლსეკციან გრაგნილებს აქვს ერთნაირი ფორმის კოკები ან სექციები. ტოლსეკციანი გრაგნილები შეიძლება იყოს ერთფენა და ორფენა. ერთფენა გრაგნილები სრულდება დიამეტრალური ბიჯით. გამონაკლისს შეადგენს გრაგნილი თანაბრად განაწილებული შუბლური შეერთებებით, რომელშიც შესა-

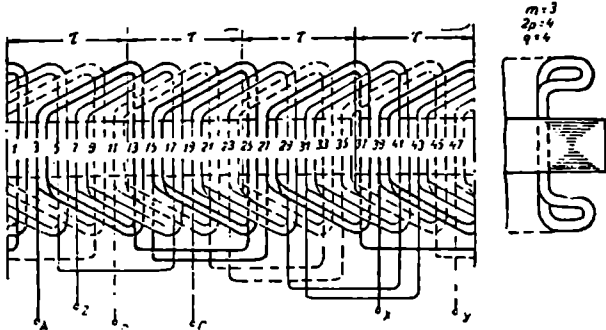


ნახ. 314. გრაგნილის შუბლური ნაწილების წახვეცილილი შეერთება დასაშლელი სტატორის შემთხვევაში.



ნახ. 315. ჯაქვეური გრაგნილის შუბლური შეერთებები.

ძლებელია განხორციელდეს ბიჯის შენოკლება. ორფენა გრაგნილები თითქმის ყოველთვის შემოკლებული ბიჯით სრულდება. დამზადების წესის მიხედვით ტოლსეკციანი გრაგნილები შეიძლება იყოს ნახევრად შაბლონური და შაბლონური. კოკების ზომების ტოლობის გამო, ტოლია მათი წინააღმდეგობებიც,

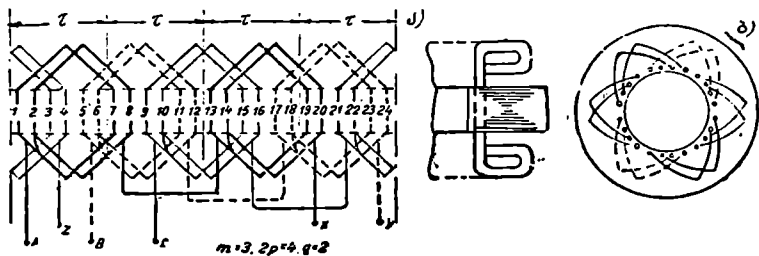


ნახ 316. ჯაქვეური გრაგნილის სქემა-განფენა.

რაც აადვილებს გრაგნილის პარალელური წრედების შექმნის შესაძლებლობას. ტოლსეკციან გრაგნილში შუბლური შეერთებების სიგრძე გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე განსხვავებული ფორმის კოკებიან გრაგნილში. ტოლსეკციანი

გრაგნილები უმთავრესად გამოყენებულია, როგორც ასინქრონული და სინქრო-
ნული მანქანების სტატორის გრაგნილები. განვიხილოთ ტოლსექციანი გრაგ-
ნილების ძირითადი სახეობანი:

1. ერთფენა ტოლსექციანი გრაგნილი დიამეტრალური
კოქებით. დიამეტრალური კოქებით ტოლსექციანი გრაგნილის შესრუ-
ლების პრინციპი მოყვანილია ნახ. 298-ზე. გრაგნილის სქემა-განფენა წარმო-
დგენილია ნახ. 317-ზე. იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $2p=4$, $q=2$, ყოველი
კოქის სიგანე (ან ბიჯი) $3q$ საკბილო დანაყოფის ტოლია (ზოგად შემთხვევაში
 m q საკბილო დანაყოფის), ე. ი. შეადგენს ერთ საპოლუსო დანაყოფს.

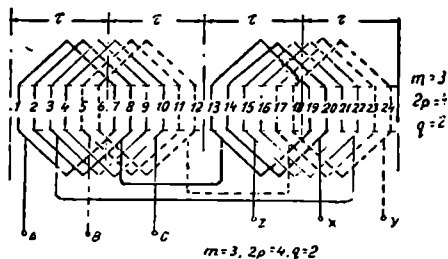


ნახ. 317. ერთფენა ტოლსექციანი გრაგნილი დიამეტრალური კოქებით.

ყოველი წვეილი პოლუსის კოქების შეერთების სქემის მიხედვით განსა-
ხილველი გრაგნილი ორსიბრტყა გრაგნილის მსგავსია ნახ. 306, მაგრამ აქეს-
ტოლსექციანი გრაგნილების ყველა უპირატესობანი. გრაგნილის გარეგანი
სახე ნაჩვენებია ნახ. 312-ზე. როგორც განსახილველი, ისევე ნებისმიერი



ნახ. 318. ერთფენა გრაგნილი დიამეტრ-
ალური კოქებით ($p=2$, $q=14$).



ნახ. 319. დასაშლელი სტატორის ორსიბრტყა
გრაგნილის შეერთების სქემა.

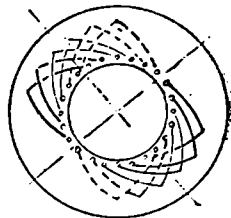
ტოლსექციანი გრაგნილის შუბლური შეერთებები მოთავსებულია ორ სიბრ-
ტყეში. გრაგნილის ნაკლს ეკუთვნის რემონტის შედარებითი სიძნელე, რაც ახასი-
თებს სიერთოდ ყველა ტოლსექციან გრაგნილებს.

2. ორსიბრტყა გრაგნილი დასაშლელი სტატორისა-
თვის. თუ გადავყურებთ ზემოთ განხილული გრაგნილის (ნახ 317) 9—15,

10—16, 21-3 და 22-4 ღრმულებში მოთავსებული კოქების შუბლურ შეერთებებს, მივიღებთ ორსიბრტყეა გრაგნილს, დასაშლელი სტატორისათვის (ნახ. 319 და 320).

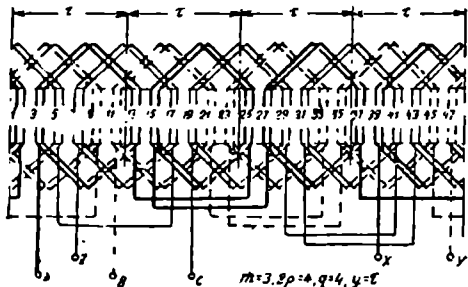
ცალკეული ფაზების კოქების ურთიერთ განლაგების მიხედვით ორსიბრტყეა გრაგნილი ემთხვევა ნახ. 313-ზე ნაჩვენებ სამსიბრტყეა გრაგნილის სქემას, დასაშლელი სტატორის შემთხვევაში, მაგრამ ამ უკანასკნელთან აქვს ტოლსექციანი გრაგნილებას ყველა უპირატესობა.

3. ერთფენა ტოლსექციანი გრაგნილი შემოკლებული კოქებით. გრაგნილის ერთი ფაზის შექმნის პრინციპი წარმოდგენილია ნახ. 299-ზე. სურათიდან გამომდინარეობს, რომ კოქის სიგანე საპოლუსო დანაყოფთან შედარებით შემოკლებულია $\frac{1}{2}$ საკბილო დანაყოფით. მაგრამ ე. შ. დ.-ის აღძვრის თვალსაზრისით ტოლსექციანი გრაგნილი შემოკლებული კოქებით აკმაყოფილებს გრაგნილის დიამეტრალობის ნიშანს (ნაწ. III, § 22) და, მაშასადამე, დიამეტრალურობიანი გრაგნილის ეკვივალენტურია. ნახ. 321-ზე მოყვანილია განსახილველი გრაგნილის სქემა, როდესაც $m=3$, $2p=4$, $q=4$, სქემიდან ჩანს, რომ ტოლსექციანი გრაგნილი ჯაქეური გრაგნილის მსგავსია (ნახ. 315), თუ უკანასკნელში არასიმეტრიული კოქები შეცვლილია სიმეტრიული კოქებით.



ნახ. 320. გრაგნილის შუბლური ნაწილების შეერთების სქემა.

4. ერთფენა გრაგნილი თანაბრად განაწილებული შუბლური შეერთებებით. გადაფუნაცვლებთ რა ადგილებს ზემოთ განხილულ გრაგნილის (ნახ. 321) ერთი ფაზის ყოველი ჯგუფის q ღრმულის ორ შიგა



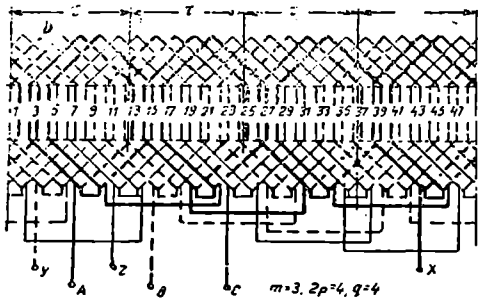
ნახ. 321. ერთფენა ტოლსექციანი გრაგნილი შემოკლებული კოქებით.

გამტარს, მივიღებთ ერთფენა თანაბრად განაწილებულ გრაგნილს, რომელსაც აგრეთვე ვაბნეულ გრაგნილს უწოდებენ. ასეთი გრაგნილის სქემა მოყვანილია ნახ. 322-ზე. გრაგნილის შუბლური შეერთებები განლაგებულია ორსიბრტყეში და იძლევა გამტარების ძალზე თანაბარ განაწილებას. როგორც გრაგნილის სქემის აგებიდან გამომდინარეობს, q ღრმულის მან-

ძილზე გამტარებში ღრმულიდან გამოსვლისას რიგრიგობით იცვლიან თავის მიმართულებას, გადაიღუნება რა ერთიდაიგივეჯერ ხან მარცხნივ, ხან კომარჯვნივ. ამის გამო ერთფენა თანაბრად განაწილებული

გრაგნილის შესრულება შესაძლებელია მხოლოდ მაშინ, როდესაც q წყვილი რიცხვია.

განსახილველ გრაგნილში შესაძლებელია განხორციელდეს ბიჯის შემოკლება. ასეთი გრაგნილის სქემა ნაჩვენებია ნახ. 322-ზე. სქემის ზემო ნაწილში ნაჩვენებია ცალკეული ფაზის გამტარების განაწილება ღრმულების მიხედვით. A, B და C ასოებით აღნიშნულია სათანადო ფაზის კოქების პირდაპირი მხარეები, ხოლო A', B' და C' ასოებით იმავე კოქების უკუ მხარეები.

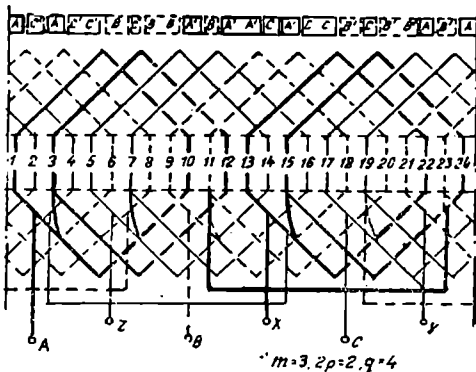


ნახ. 322. თანბრად განაწილებული გრაგნილის სქემა (წყვილი ღრმულების ნომრები ნაჩვენებია არაა).

იმავე კოქების უკუ მხარეები. იმისათვის, რომ დარღვეული არ იქნეს შუბლური შეერთების თანაბარი განაწილება, ბიჯის შემოკლება შესაძლებელია მხოლოდ ღრმულთა წყვილი რიცხვით (2, 4, 6, ...) შემოკლებული გრაგნილის შუბლური შეერთების სიგრძე ნაკლებია; ვიდრე დიამეტრალური გრაგნილის შემთხვევაში. შემოკლებული ბიჯის გავლენა გრაგნილის ე. მ. ძ-ის შემცირებაზე შესაძლებელია განისაზღვროს ღრმულთა ე. მ. ძ-ის ვარსკვლავიდან.

5. ო რ ფ ე ნ ა გ რ ა გ ნ ი ლ ე ბ ი. თუ ერთფენა გრაგნილის (ნახ. 322) თითოეული კოქის მარჯვენა (უკუ) მხარეებს მოვათავსებთ ღრმულების ქვედა

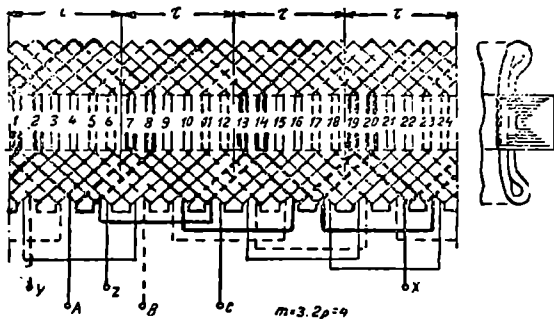
ფენაში, მივიღებთ ორფენა გრაგნილს. თავისი შესრულების მიხედვით ორფენა გრაგნილი წარმოადგენს მულმივი. დენის მანქანის გაკრილ გრაგნილს. ნახ. 324-ზე წარმოდგენილია ორფენა გრაგნილი დიამეტრალური ბიჯით იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $m=3$, $2p=4$ და $q=2$. შუბლური შეერთების ფორმის მიხედვით არჩევენ გრაგნილის „ევროპულ“ და „ამერიკულ“ კონსტრუქციებს. ევროპულ გრაგნილში, რომელსაც უმთავრესად ევროპაში ჰქონდა გავრცელება, შუბლური შეერთებები განლაგებულია მანქანის ტორსულ ზედაპირების პარალელურ ორ სიბრტყეში (ნახ.



ნახ. 323. ერთფენა გრაგნილი შემოკლებული ბიჯით.

325). ამერიკის შეერთებულ შტატებში დიდი გავრცელება ჰპოვა ე. წ. ამერიკულმა გრაგნილმა, რომლის შებლური შეერთებების გადმოღუნვა ხდება კონუსის მსახველზე (ნახ. 326).

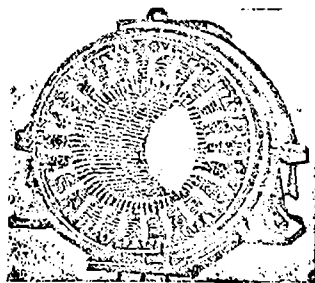
შემოკლებული გრაგნილების დიდი უპირატესობის გამო (იხ. ზემოთ) ორფენა გრაგნილი უმთავრესად შემოკლებული ბიჯით სრულდება, ვინაიდან



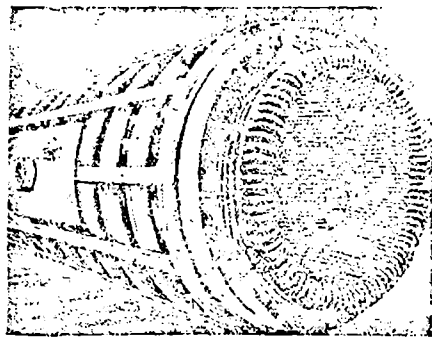
ნახ. 324. ორფენა გრაგნილის სქემა-განფენა დიაგნოზალური ბიჯით.

ნახ. 327-ზე წარმოდგენილია ორფენა გრაგნილი შემოკლებული ბიჯით $\gamma = \frac{5}{6} \tau$. იმ შემთხვევაში, როდესაც $m=3$; $2p=4$ და $q=2$.

ნახ. 327-ე სქემის ზემო ნაწილში მოყვანილია გამტარების ღრმულებში განაწილება, საიდანაც ჩანს, რომ ბიჯის შემოკლება არა სცვლის რა ქვედა ფენის გამტარების ურთიერთ განლაგებას, იწვევს მხოლოდ



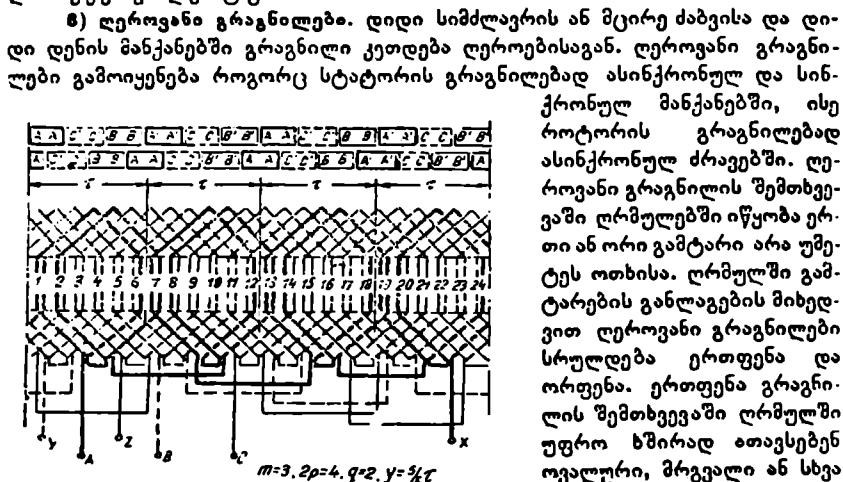
ნახ. 325. „ვეროპული“ ორფენა გრაგნილი ($q=2$, $2p=6$)



ნახ. 326. „ამერიკული“ ორფენა გრაგნილი.

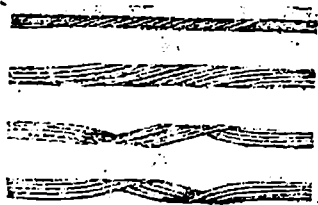
ქვედა და ზედა ფენების ურთიერთ დაძვრას $1/6\tau$ -ით. თუ საერთო შემთხვევაში $\beta = \frac{\gamma}{\tau}$, მაშინ ქვედა ფენის დაძვრა ზედა ფენის მიმართ შეადგენს $(1-\beta)\tau$.

ამგვარად ორფენა გრაგნილი შემოკლებული ბიჯით თავისი ელექტრომაგნიტური თვისებებით ერთმანეთის მიმართ (1-ჰ) დაძრულ ორი დიამეტრალურ ბიჯიანი გრაგნილის ეკვივალენტურია.



ნახ. 327. ორფენა გრაგნილის სქემა-განფენა შემოკლებული ფორმის ერთ ლეროს, რომელიც მთლიანად ავსებს სათანადო ფორმის ღრმულს (ნახ.

293 ბ, გ). ორფენა გრაგნილში ლეროების რიცხვი ღრმულში უფრო მეტად ორის ტოლია. დიდი კვეთის ლეროები მათში ფუკოს დენებით გამოწვეულ და-



ნახ. 328. დახვეული ღერო გრაგნილში ანატეხითი დანაკარგების შემცირების მიზნით.



ნახ. 329. ღეროვანი გრაგნილის შებლური ნაწილების დამატება.

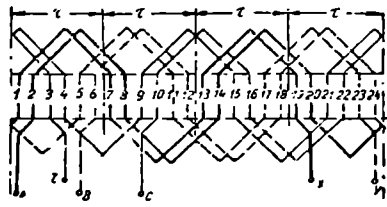
მატებითი დანაკარგების თავიდან აცილების მიზნით მზადდება სპილენძის თხელი გამტარების ფენებისაგან. ეს გამტარები ისეა დაწნული, რომ თითოეული გამტარის ცალკეული უბნები ღეროში ღრმულის გასწვრივ გადასვლისას განლაგდება ღრმულის სხვადასხვა ფენაში (ნახ. 328 და 389)

შუბლურ ნაწილებში ღეროების ერთმანეთთან შეერთება წარმოებს ფირფიტოვანი სპილენძის მასიური რკალებით. ან ჩანგლებით (ნახ. 329).

ღეროების შეერთების სქემის მიხედვით არჩევენ ტალღურ და ყულფურ გრაგნილებს.

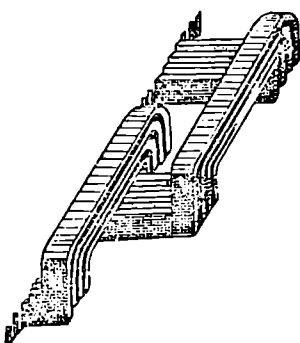
1. ტალღური გრაგნილები. ტალღური ანუ შემოვლილი გრაგნილი მიიღება, სტატორის ან როტორის წრებაზე უწყვეტი შემოვლისას ყველა პოლუსის ქვეშ მოთავსებული გამტარების მიმდევრობითი შეერთებით. სქემის მიხედვით ერთი ღეროდან მეორეზე ტალღური გადასვლის გამო ამ გრაგნილმა „ტალღურის“ სახელწოდება მიიღო. ნახ. 330-ზე წარმოდგენილია ერთფენა ღეროვანი გრაგნილი

ტოლი სქეციებით, იმ შემთხვევაში, თუ $m=3$, $2p=4$, $q=2$. წრებაზის ერთი შემოვლის დროს შეიქმნება ტოლი ბიჯების მქონე ხვევების მიმდევრობითი წრედი. ყოველ მომდევნო წრედთან გადასვლა ხდება შემაერთებელი ბიჯის საშუალებით, რომელიც გრაგნილის წრედის ჩაკეტვის თავიდან აცილების მიზნით შემოკლებულია ან დაგრძელებული. ერთფენა გრაგნილის ორსიბრტყეა კოქსისებური სქემით შესრულებისას, შუბლურ შეერთებებს ვლბულობთ ორ სიბრტყეში განლაგებულ კონცენტრული რკალების სახით (ნახ. 331).



ნახ. 330. ერთფენა ტალღური გრაგნილის სქემა-განფენა.

ტალღური გრაგნილის ორფენა შესრულებისას შემოვლათა რიცხვი ერთ-

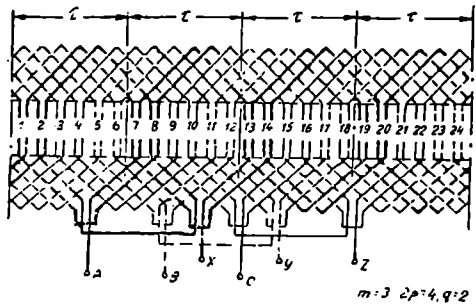


ნახ. 331. ღეროვანი გრაგნილის შუბლური ნაწილების კონცენტრული შეერთება.

ფენა გრაგნილთან შედარებით ორჯეცდება. ნახ. 332-ზე წარმოდგენილია ორფენა გრაგნილი, რომლისთვისაც $m=3$, $2p=4$ და $q=2$. გრაგნილის შემოვლათა პირველი ნახევარი, ისევე როგორც ერთფენა გრაგნილში, სრულდება მარჯვნივ. შემოვლათა მეორე ნახევარი სრულდება საწინააღმდეგო მიმართულებით (მარცხნივ). ორფენა კოქსისებური გრაგნილების ანალოგიურად, ორფენა ღეროვან გრაგნილებში ადვილად განხორციელდება ბიჯის შემოკლება, დადგარათ რა ქვედა ფენას ზედა ფენის მიმართ. ასეთ გრაგნილებს, რომელთა შუბლური შეერთებები კონუსის მსახველზეა ამოღუნული, აგრეთვე „აპე-

რიკულს“ უწოდებენ. ორფენა ტალღური გრაგნილები იხმარება ასინქრონული ძრავების როტორებისათვის და ჩვეულებრივად დიამეტრალურიძბიჯით სრულდება.

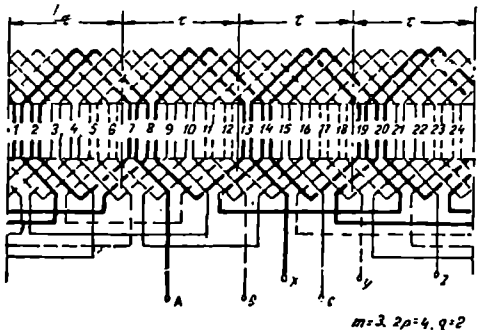
2. ყულფური გრაგნილები. ყულფური გრაგნილი შეიქმნება წრედებისაგან, რომელთა გამტარები მოთავსებულია მეზობელ პოლუსების ქვეშ. როგორც ნახ. 333-ის სქემიდან ჩანს, ყულფური გრაგნილი შეიქმნება ერთი ღეროდან მეორეზე ყულფისებური გადასვლით, საიდანაც წარმოდგამის სახელწოდება. ნახ. 333-ზე წარმოდგენილია ორფენა ყულფური გრაგნილი, მონაცემებით $m=3$, $2p=4$ და $q=2$. ტალღურისაგან განსხვავებით ყულფურ გრაგნილში ადვილია პარალელური წრედების შექმნა. ყულფური გრაგნილი შესაძლებელია იყოს აგრეთვე ერთფენა. ყულფური გრაგნილის შუბლური შეერთებები შესაძლებელია შესრულდეს იმავე ვარიანტებში, როგორც



ნახ. 332. ორფენა ტალღური გრაგნილის სქემა-განფენა.

ტალღური გრაგნილის შუბლური შეერთებები. ნახ. 332 და 333 ის შედარებიდან ჩანს, რომ ყულფური გრაგნილი ტალღურისაგან განსხვავდება მხოლოდ ერთ ფაზაში შემავალი გამტარების შეერთების მიმდევრობით.

ზ) წილადური გრაგნილები. გრაგნილები პოლუსზე და ფაზაზე q ღრმულთა წილადი რიცხვით საშუალებას გვაძლევს მანქანის შედარებით მცირე ღრმულთა საერთო რიცხვის შემთხვევაშიაც კი მივიღოთ დაახლოებით სინუსოიდური ე. მ. დ.-ის მრუდი. ეს აიხსნება იმით, რომ სხვადასხვა პოლუსის ქვეშ მდებარე ერთი და იგივე ფაზის მიმდევრობით შეერთებულ კოჭათა ჯგუფები მცირედ დაძრული აღმოჩნდება მაგნიტურ არეში, რასაც მიყვებართ ე. მ. დ.-ის მრუდში უმაღლესი



ნახ. 333. ორფენა ყულფური გრაგნილის სქემა-განფენა.

ჰარმონიკების მოსპობამდე. წილადური გრაგნილები იხმარება მრავალპოლუსა მანქანებში (მაგალითად, ჰიდროგენერატორებში), რომლებშიც საპოლუსო დანაყოფის შეზღუდული ზომების გამო q წარმოადგენს მცირე რიცხვს. აგრეთვე მაღალი ძაბვის მანქანებში, სადაც ღრმულის სივრცის უკეთესი გამოყენებისათვის q იმდენად მცირეა ($q < 1$), რომ გრაგნილი q მთელი რიცხვით საერთოდ შეუძლებელია ან იძლევა ე. მ. დ.-ის მრუდის ცუდ ფორმას. ზოგჯერ წილადურ გრაგნილებს ხმარობენ ქარხანაში არსებული კომპაუნდური შტამპების გამო-

ყენების მიზნით მანქანების პოლუსების რიცხვის, ბრუნვის სიჩქარეების და, მაშასადამე დიდი დიაპაზონისათვის. წილადური გრაგნილის ბიჯი ყოველთვის შემოკლებული გამოდის, რაც გვაძლევს სპილენძის ეკონომიის შუბლურ შეერთებებზე. წილადური გრაგნილის დიდ ნაკლს წარმოადგენს გრაგნილის მიერ შექმნილი დამამაგნიტებელი ძალების მრუდის არასიმეტრიულობა, რის გამო ერიდებიან მის გამოყენებას ასინქრონულ ძრავებში. კონსტრუქციის მხრივ წილადური გრაგნილები გვხვდება ნებისმიერი, ზემოთ აღწერილი შესრულებით.

წილადური გრაგნილის შექმნის პირობები უფრო ადვილად გასაგებია ღრმულთა ე. მ. დ.-ის ვარსკვლავის საშუალებით. როგორც წინა, მასალიდანაა ცნობილი, ღრმულთა ე. მ. დ.-ის ვარსკვლავის აგებისათვის საერთო ცენტრიდან გადასდებენ ღრმულთა ე. მ. დ.-ების ვექტორებს ღრმულთა თანმიმდევრობის მიხედვით. გადასაზომ ვექტორებს შორის მოთავსებული კუთხე ტოლია ფაზებს შორის მოთავსებულ კუთხისა, რომელიც გამოხატულია ელექტრულ გრადუსებში: $\alpha = \frac{360 \cdot p}{Z}$, სადაც Z — ღრმულთა რიცხვია, p — წყვილ პოლუსთა რიცხვი.

ორი საპოლუსო დანაყოფის გასწვრივ ღრმულების შემოვლა დიაგრამაზე შეესაბამება ვექტორების მობრუნებას 360° -ით. ამ მობრუნების დროს გადადებულ ვექტორთა რიცხვი შეადგენს $\frac{360}{\alpha} = \frac{Z}{p}$.

თუ $\frac{Z}{p}$ — მთელი რიცხვია, მაშინ ღრმულების შემდეგი შემოვლის დროს ახლად გადადებული ვექტორები დაემთხვევა წინათ გადადებულ ვექტორებს. საერთო შემთხვევაში, თუ $\frac{Z}{p}$ არ არის მთელი რიცხვი და Z -ს და p -ს აქვს სა-

ერთო უდიდესი გამყოფი d , მაშინ ღრმულთა ვარსკვლავს ექნება $Z_d = \frac{Z}{d}$ სხივი, თითოეულ სხივში შეთავსებული იქნება d ვექტორი.

ცხადია, ე. მ. დ.-ის m ფაზა სისტემის შექმნისათვის, როდესაც მთელი ღრმულები შეესებულება, აუცილებელია რომ ვარსკვლავის სხივთა Z_d რიცხვი იყოფოდეს m -ზე, ე. ი. $\frac{Z_d}{m} = \frac{Z}{md} =$ მთელ რიცხვს. ეს პირობა ყვე-

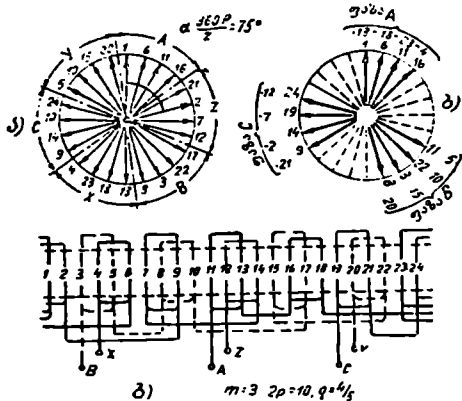
ლა ღრმულის შევსებისას აუცილებელია ნებისმიერი წილადური გრაგნილის შესრულებისათვის და, ორ ფენა წილადური გრაგნილისათვის საკმარისიც. კოქისებური ერთფენა წილადური გრაგნილისათვის დამატებით საჭიროა აგრეთვე, რომ ღრმულთა რიცხვი ფაზაზე იყოს წყვილი, რადგანაც გრაგნილის ყოველ კოქას უკავია ორი ღრმული. ზოგჯერ წილადური გრაგნილის შემთხვევაში ღრმულების ნაწილში გრაგნილს არ აწყობენ.

ღრმულების განაწილება ფაზების მიხედვით შეიძლება ვიპოვოთ ღრმულთა ვარსკვლავის დანმარებთ. მაგალითისათვის განვიხილოთ ერთფენა კოქისებური გრაგნილი, მონაცემებით $m=3$, $2p=10$ და $q=4/5$. გრაგნილის 17. ელექტრული მანქანები.

ღრმულთა რიცხვი $Z=2pmq=24$. Z და p საერთო უდიდესი გამყოფია $d=1$. ამიტომ ღრმულთა ვარსკვლავის სხივთა რიცხვი ტოლი იქნება $Z_d=Z=24$. გრაგნილი აკმაყოფილებს შესრულების პირობებს. ღრმულთა ვარსკვლავის აგებისათვის გადავდოთ ყველა Z ვექტორები ერთიმეორისაგან კუთხით

$$\alpha = \frac{360p}{Z} = 75^\circ \quad (\text{ნახ. 334, ა}), \text{ დავეოთ ვარსკვლავი } 2m=6 \text{ უბნად და დავა-}$$

ჯგუფოთ ვექტორები ფაზების მიხედვით (ნახ. 334, ბ). ვექტორების ერთი ნახევარი შეესაბამება კოქების ან ხვევების პირდაპირ მხარეებს, ხოლო ვექტორების მიწის ნიშნით აღნიშნული მეორე ნახევარი კი უკუმხარეებს. კოქების შექმნას ისეთნაირად უნდა ვეცადოთ, რომ შუბლური შეერთების სიგრძე იყოს რაც შეიძლება მოკლე.



ნახ. 334. ერთფენა ნაწილობრივი გრაგნილი.

რიცხვი ან $q' = \frac{Z_d}{2m} = \frac{Z}{2md}$ ღრმულთა რიცხვი პოლუსსა და ფაზაზე.

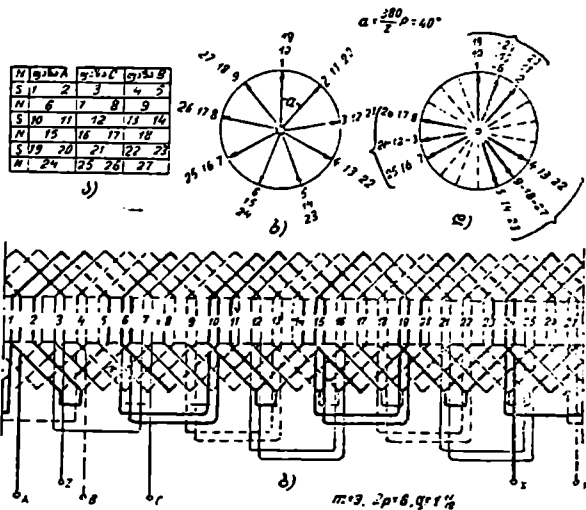
განსახილველი გრაგნილისათვის $q'=4$, ე. ი. $q=4/5$ წილადის მრიცხველის ტოლია. გრაგნილის კოეფიციენტები გრაგნილისათვის, რომლის $q'=4$ ღრმულს პოლუსზე და ფაზაზე, ტოლია (იხ. ცხრილი 17): პირველი ჰარმონიკისათვის—0,958. მეესამე ჰარმონიკისათვის—0,654, მეხუთესათვის—0,205, მეშვიდესათვის 0,158. ამ კოეფიციენტების სიდიდებით ადასტურებს წილადური q -ს დადებით გავლენას უმაღლესი ჰარმონიკების შემცირებაზე, მაშინ, როდესაც ძირითადი ჰარმონიკა უმნიშვნელოდ მცირდება.

ორფენა გრაგნილისათვის, წილადური q -თი ღრმულებისა და გამტარების განაწილება ფაზების მიხედვით მოსახერხებელია ვაწარმოოთ უჯრედიან ქალაღზე¹. წარმოვადგინოთ q წესიერი წილადის სახით $q = \frac{a}{b}$. მაგალი-

¹. ორფენა წილადური გრაგნილისათვის ღრმულთა განაწილება შესაძლებელია მოვახდინოთ ისევე, როგორც ერთფენა გრაგნილის შემთხვევაში, ღრმულთა ე. მ. დ.-ბის ვარსკვლავის საშუალებით.

თისათვის განვიხილოთ სამფაზა გრაგნილი, $q = \frac{\gamma}{2\rho m} = \frac{27}{2 \cdot 3 \cdot 3} = \frac{3}{2}$. ნივ.

ლებთ რა l საკბილო დანაყოფს b უჯრედის ტოლად (ჩვენი მაგალითისათვის $h=2$), უჯრედიან ქალაღზე დავეტანთ მთელ საკბილო ბიჯებს სტრიქონში ისე, რომ ერთი საპოლუსო დანაყოფი მოთავსდეს მეორის ქვეშ (ნახ. 335,ა). ცალკეული ფაზის ზონები დავყოთ ვერტიკალური ხაზებით, მივიღებთ რა მხედველობაში, რომ ყოველი ფაზა საპოლუსო დანაყოფზე იკავებს q ღრმულს, რაც საკბილო ბიჯის მასშტაბში შეადგენს a უჯრედს (ჩვენი მაგალითისათვის $a=3$). დაენოშრავთ რა ერთიმეორის მიყოლებით მთელ საკბილო ბიჯებს და.



ნახ. 335. ორფენა ნაწილობრივი გრაგნილი.

მაშასადამე ღრმულებსაც, მივიღებთ უკანასკნელის განაწილებას ცალკეული ფაზების ზონების მიხედვით. ღრმულების ეს განაწილება ამავე დროს წარმოადგენს გრაგნილის ზედა (ან ქვედა) ფენის გამტარების განაწილებას. მეორე ფენის გამტარების განაწილება ზუსტად იგივეა, მაგრამ დაძრულია ზედა ფენის გამტარების მიმართ გრაგნილის ბიჯის γ სიდიდით, რომელიც საპოლუსო დანაყოფზე ცოტა ნაკლები იღება (ჩვენი მაგალითისათვის $\gamma=4$). ასეთნაირად აგებული ცხრილი ადვილად გვაძლევს საშუალებას არა მარტო თვალის დადევნოთ გრაგნილის განაწილებას ღრმულების მიხედვით, არამედ დავადგინოთ აგრეთვე გრაგნილის გამტარების განლაგება მაგნიტური არეს მიმართ მანქანის საჭაერო ღრეჩოში. ასე, მაგალითად, ნახ. 335, ა-ზე, ჩანს, რომ ერთი საპოლუსო დანაყოფის მანძილზე ცალკეული ფაზები არასიმეტრიულადაა განაწილებული, ამავე დროს ორი საპოლუსო დანაყოფის მანძილზე ადგილი აქვს ფაზების სრულ სიმეტრიულობას. ცხრილის საშუალებით მოსახერ-

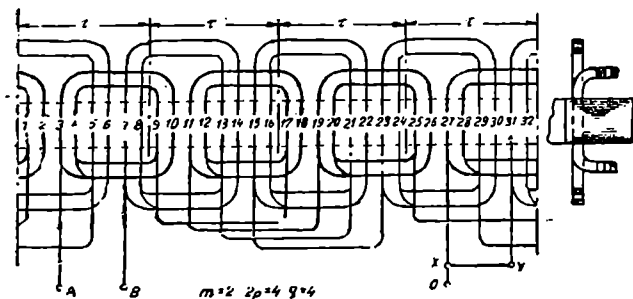
ხებელია ასევე დავადგინოთ ყოველი ფაზის დასაწყისების და ბოლოების გამოყვანები. ნახ. 333, ბ-ზე გაროსახულია გრაგნილის სქემა-განფენა, ნახ. 335, გ-ზე კა ღრმულთა ვარსკვლავი. ღრმულთა რიცხვს $Z=27$ და წყვილ პოლუსთა რიცხვს $p=3$ აქვს საერთო უდიდესი გამყოფი $d=3$, მაშასადამე, ვარსკვლავის სხივთა რიცხვი $Z_d = \frac{Z}{d} = 9$ და ყოველ სხივში შეესებულა

$d=3$ ვექტორი. ნახ. 335, დ-ზე მოყვანილია ვექტორების ფაზების მიხედვით დაჯგუფების დიაგრამა, საიდანაც გამომდინარეობს, რომ, თუ Z_d კენტი რიცხვია, ე. მ. ძ-ის აღძვრის თვალსაზრისით წილადური გრაგნილი ეკვივალენტურია ორპოლუსა მანქანის გრაგნილის, რომელსაც აქვს $2Z_d$ ღრმული, ან ღრმულთა რიცხვი პოლუსსა და ფაზაზე $q' = \frac{2Z_d}{2m} = \frac{Z}{md}$. ჩვენი მაგალითისათვის $q'=3$, ანუ კვლავ

არაწესიერი წილადის $q = \frac{3}{2}$ მრიცხველის ტოლია. ორენა გრაგნილის ე.

მ. ძ-ის განსაზღვრისათვის გარდა განაწილების კოეფიციენტისა (რომელიც განისაზღვრება q' -ით) აუცილებელია მხედველობაში მივიღოთ ბიჯის შემოკლების კოეფიციენტი.

თ) ორფაზა და ერთფაზა გრაგნილები. ორფაზა ერთენა გრაგნილები სრულდება სამფაზა საშისბრტყა გრაგნილების ანალოგიურად, მაგრამ მათი შუბლური შეერთებები იღებს ისეთივე ფორმის, როგორც სამფაზა ორსიბრტყა გრაგნილებში. ნახ. 385-ზე წარმოდგენილია ორფაზა კოქისებური გრაგნილი, მონაცემებით $2p=4$ და $q=4$. ორფაზა გრაგნილის სხვაგვარი შესრულების



ნახ. 336. ერთენა ორფაზა გრაგნილის სქემა განფენა.

მიმართ (სახელდობრ ერთენა და ორენა) კოქისებური ტოლსეკციანი და ღეროვანი გრაგნილების ზიმართ, სამართლიანია ყველაფერი ის, რაც იყო თქმული სამფაზა გრაგნილებზე. ერთფაზა გრაგნილში ჩვეულებრივად შეესებულა ღრმულების $2/3$. ყველა ღრმულის შეესების შემთხვევაში გენერატორში დაინდლქტირებული ე. მ. ძ. ან ძრავის დამამაგნიტებელი ძალა უმნიშვნელოდ იზრდება მაშინ, როდესაც შესაძინეად იზრდება სპილენძის წონა და დანაკარგები მასში. ეს აიხსნება გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტის დიდი

შემცირებით. მართლაც, თუ გრაგნილს ჩავთვლით თანაბრად განაწილებულ ჯამტართა საკმაოდ დიდი რიცხვით, მივიღებთ განაწილების კოეფიციენტის შემდეგ მნიშვნელობებს (ნაწ. III, § 22, დ)

ა) თუ შევსებულია ღრმულთა რიცხვის $2/3$

$$k_p = \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\frac{\beta}{2}} = 0,827,$$

მაღაღ

$$\beta = \frac{2}{3} \pi;$$

ბ) თუ შევსებულია ყველა ღრმული

$$k_p = \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\frac{\beta}{2}} = \frac{2}{\pi} = 0.637.$$

მაღაღ

$$\beta = \pi.$$

მაშასადამე, სპილენძის ხარჯის $1 : \frac{2}{3} = 1,5$ -ჯერ გაზრდისა და დენის

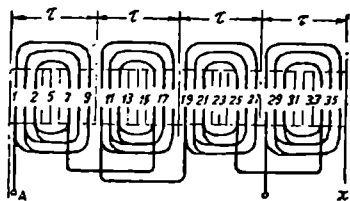
უცვლელი სიმკვრივისას 50% -ით გაზრდილი დანაკარგების შემთხვევაში მანქანის ძაბვა იზრდება მხოლოდ $(1,5 \times 0,637) : (1 \times 0,827) = 1,15$ -ჯერ, ე. ი. 15% -ით. ერთფაზა გრაგნილებიც სრულდება სამფაზა სამსიბრტყეა გრაგნილის შექმნის პრინციპის მიხედვით. ნახ. 337-ზე წარმოდგენილია ერთფაზა გრაგნილის სქემა-განფენა, როდესაც $2p=4$ და ერთ პოლუსზე შევსებულია 6 ღრმული, ხოლო 3 თავისუფალი.

ერთფაზა გრაგნილად შეიძლება ვად შეერთებული სამფაზა გრაგნილის ორი ფაზა. მაგრამ ამ დროს იზრდება სპილენძის ხარჯი შუბლურ ნაწილებზე.

ი) ცვლადი დენის სპეციალური გრაგნილები. ცვლადი დენის მანქანებში გვხვდება სპეციალური დანიშნულებისა და შესრულების მთელი რიგი გრაგნილებისა. სპეციალური გრაგნილების განსაკუთრებით დიდ სხვადასხვაობას ვხვდებით ასინქრონულ ძრავებში. ჩამოვთვალოთ გრაგნილების ყველაზე მეტად ცნობილი ტიპები:

1) მოკლედ შერთული გრაგნილი ციყვის ბორბლის ჩვეულებრივი შესართლების სახით ან სხვა მოდიფიკაციით ღრმა ღრმულებით, ორმაგი ციყვის ბორბლით (ბუშერო) და სხვ.

გამოყენებულ იქნეს ვარსკვლავ-



$m=1, 2p=4, q=5, Z=36$

ნახ. 337. ერთფაზა ერთფაზა გრაგნილის სქემა-განფენა.

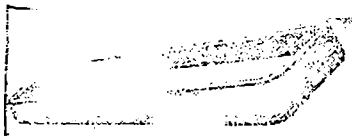
2) სინქრონული მანქანის სადემპფერო (დამაწყნარებელი) და გამჭვივარე ნიღბი.

3) გრაგნილი ასინქრონული ძრავისათვის პოლუსთა სხვადასხვა რიცხვზე გადაართვით.

4) ასინქრონული ძრავის გრაგნილი ე. წ. წინაღუერტებით.

ვინაიდან ამ გრაგნილების განხილვის დროს მთავარ ინტერესს წარმოადგენს ამ გრაგნილებით აღჭურვილი მანქანების მუშა თვისებების შესწავლა, ანტიკომ სპეციალური გრაგნილების აღწერა მოცემული იქნება წიგნის სათანადო ნაწილებში.

კ) მულმივი დენის აღზნების გრაგნილები. აღზნების გრაგნილი სინქრონულ მანქანებში გამოიყენება მაგნიტური არეს აღზნებისათვის და ჩვეულებრივად მოთავსებულია მანქანის მოძრავ ნაწილზე—როტორზე. ვანიცილიან რა ცენტროგამსწრაფი ძალების განუწყვეტელ ზემოქმედებას, ისინი მექანიკური თვალსაზრისით საიმედოდ უნდა იყოს შესრულებული. არჩევენ აღზნების შეყურსული (ნახ. 291) და განაწილებულ (ნახ. 292) გრაგნილებს. აღზნების შეყურსული გრაგნილები იხმარება ცხადპოლუსა სინქრონულ მანქანებში. აღზნების შეყურსული გრაგნილი შედგება კოქების რიგისაგან, რომლებიც ჩამოცმულია სინქრონული მანქანის პოლუსის გულაზე. კოქები ჩვეულებრივად კეთდება სწორკუთხა კვეთის სპილენძისაგან და მხოლოდ მცირე სიძლიერის (დაახლოებით 25 კვტ-მდე) მანქანებისათვის გამოიყენება მრგვალი კვეთის გამტარი.



ნახ. 338. ტურბოგენერატორის როტორის სეგმეა.

გისაგან. ნახ. 338-ზე ნაჩვენებია ტურბოგენერატორის როტორის კოქა. კოქას ხვევები ეწყობა ხრახნულად და მზადდება მხოლოდ ბრტყელი სწორკუთხა სპილენძისაგან. აღზნების გრაგნილთან დენის მიყვანა განხორციელებულია საკონტაქტო რგოლების საშუალებით. აღზნების ძაბვა ჩვეულებრივად 250 V არ აღემატება.

24. ცვლადი დენის გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალა

ა) ხაზურ დატვირთვასა და დამამაგნიტებელ ძალას შორის დამოკიდებულება. ყოველ ელექტრულ მანქანაში დენი გადადის რა სტატორისა და როტორის გრაგნილებში, ჰქმნის მაგნიტურ არეს. გრაგნილების მაგნიტური არეს ანალიზის დროს მხედველობაში უნდა გვექონდეს რომ არე დამოკიდებულია არა მარტო გრაგნილების სისტემაზე და საჭირო ღრეჩოს გასწვრივ გამტარების განაწილებაზე, არამედ აგრეთვე დამოკიდებულია მანქანის მაგნიტური წრედის თვისებებზე. ეს გამომდინარეობს სრული დენის კანონიდან (ნაწ. 1, § 2, ბ), რომლის თანახმად:

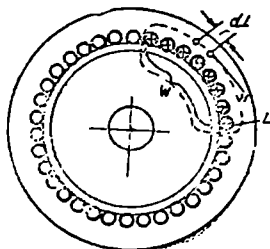
$$i\omega = \oint \bar{H} \bar{dl}, \quad (24,1)$$

სადაც— $i\omega$ გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალაა, ხოლო $\oint \bar{H} \bar{dl}$ დამოკიდებულა გარემოს მაგნიტურ თვისებებზე და მაგნიტური სისტემის იმ უბნების გეომეტრიულ ზომებზე, რომლის საშუალებითაც იკვრება არეს ინდუქციური ხაზები (ნახ. 339).

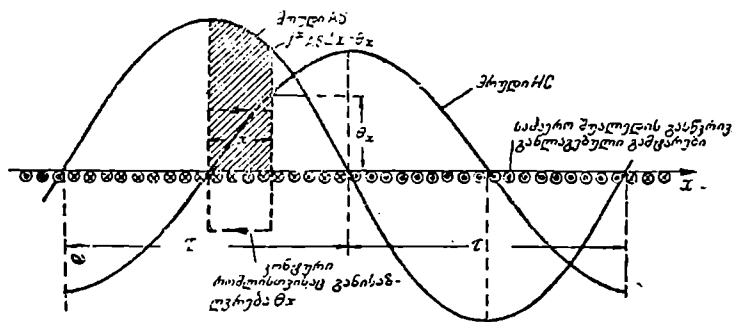
წინამდებარე ნაწილში განხილული იქნება გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალები, რათა შემდეგში, გვეცოდინება რა მათი სიერცული განაწილება, შესაძლებელია იქნეს მაგნიტური ინდუქციის პონა საპაერო ღრეჩოში და მანქანის მაგნიტური სისტემის სხვა ნაწილებში.

ამპერგამტარების რიცხვს, რომელიც მოდის საპაერო ღრეჩოს გარშემოწერილობის 1 სმ-ზე, ხ ა ზ უ რ ი და ტ ვ ი რ თ ვ ა ე წ ო დ ე ბ ა და, ჩეეულებრივად აღინიშნება ასობით AS .

ნახ. 340-ზე მაგალითისათვის ნაჩვენებია შემთხვევა, როდესაც დენი გრაგნილის გამტარებში საპაერო ღრეჩოს გასწვრივ განაწილებულა სინუსოიდის კანონით. ამ შემთხვევაში AS მრუდს ექნება სინუსოიდური ხასიათი. ნახ. 340-დან ჩანს, რომ დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი წარმოად-



ნახ. 339. ელექტრული მანქანის მაგნიტური კონტური.



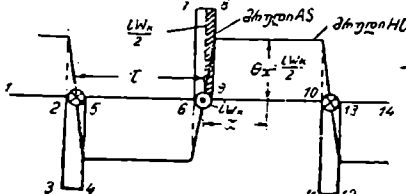
ნახ. 340. ხაზური დატვირთვის (AS) და დამამაგნიტებელი ძალის (Θ) მრუდები, როდესაც დენის განაწილება გამტარებში სინუსოიდური წესით იცვლება.

გენს ინტეგრალურს AS მრუდის მიმართ და, რომ საპაერო ღრეჩოს ნებისმიერ წერტილში დამამაგნიტებელი ძალა ტოლია:

$$\Theta_x = \int_0^x AS \cdot dx. \quad (24,2)$$

ეს ტოლობა სამართლიანია მანქანის საჭაერო ღრეჩოს გარშემოწერილობის გასწვრივ ხაზური დატვირთვის განაწილების ნებისმიერი კანონისათვის. დამამაგნიტებელი ძალის მრუდების აგებისას ჩვეულებრივად, კონტურს, რომლისთვისაც განისაზღვრება სრული დენი, შემოხაზავენ ისეთნაირად (ნახ. 340), რომ მან გაიაროს საჭაერო ღრეჩოს იმ 0 წერტილში, სადაც არეს დაძაბულობა ნულის ტოლია. ამ შემთხვევაში დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი სიმეტრიულია აბსცისათა ღერძის მიმართ.

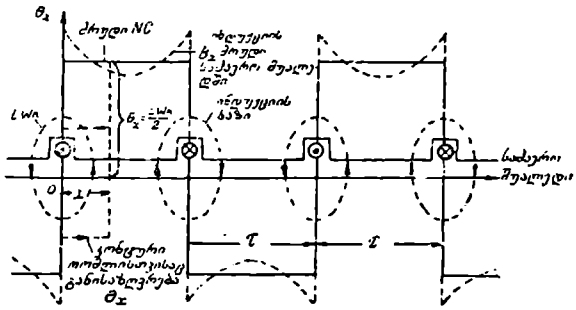
ბ) ერთფაზა ერთკოჯა გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალა. დამამაგნიტებელი ძალის მრუდების განხილვა დაეწყოთ ერთფაზა ერთკოჯიანი გრაგნილი, როდესაც ერთ წვეილ პოლუსზე მოდის მხოლოდ ერთი კოჯა ω_k ხევეათა რიცხვით. AS-ის განაწილების მრუდი ამ შემთხვევაში წარმოადგენს 1-2-3...14



ნახ. 341. AS და 6 მრუდები ერთფაზა კოჯისებური გრაგნილისათვის.

ტეხილ ხაზს, ხოლო დამამაგნიტებელი ძალის მრუდს, როგორც ინტეგრალურს, ექნება ტრაპეციოიდური ხასიათი. ვინაიდან კოჯას აქტიური მხარის ზომები მცირეა საპოლუსო დანაყოფთან შედარებით, ჩვეულებრივად დამამაგნიტებელი ძალის ტრაპეციოიდურ მრუდს სცვლიან სწორკუთხედით ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ.

342-ზე.¹ როგორც ნახ. 342-დან ჩანს, სწორკუთხედის სიმაღლე ტოლია $\frac{im_k}{2}$. ის დამოკიდებულია კოჯას ხევეებში გამავალი $[i = f(\theta)]$ ცვლადი დენის მყის



ნახ. 342. მ-ს გამარტივებული მრუდი ერთფაზა ერთსექციანი გრაგნილის შემთხვევაში.

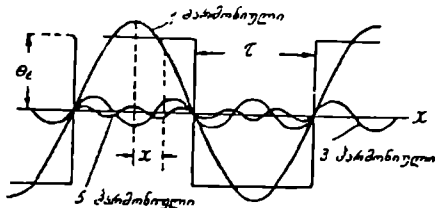
მნიშვნელობაზე, ე. ი. თვითონაც წარმოადგენს დროის მიხედვით ცვალებად სიდიდეს და იცვლება იგივე კანონით, როგორც დენი.

¹ დამამაგნიტებელი ძალის განაწილების და მაგნიტური სისტემის პარამეტრებისაგან არეს დამოკიდებულების ელუსტრაციისათვის იმავე ნახაზე წყვეტილი ხაზით ნაჩვენებია B_x ინტეგრალის მრუდი თანაბარი საჭაერო ღრეჩოს შემთხვევაში და დერომაგნიტური ნაწილების წინააღმდეგობების მხედველობაში მიღებით.

სინუსოიდური დენის შემთხვევაში ერთი კოქას დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი წარმოადგენს პარამონულად პულსირებულ უძრავ სწორკუთხა ტალღას.

ელექტრული მანქანების თეორიის გამოყენების თვალსაზრისით მოსახერხებელია ამ ტალღის დაშლა ფურიეს მწკრივად და აგრეთვე საპაერო ღრე-

ჩოს გასწვრივ საწინააღმდეგო მიმართულებით მზრუნავ ტალღებად. ასეთი დაშლა მრავალ შემთხვევაში ძალზე აადვილებს ელექტრულ მანქანაში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების ანალიზს. საპაერო ღრეჩოს კოორდინატის დასაწყისი შევუთავსოთ კოქას



ნახ. 343. დამამაგნიტებელი ძალის ჰარმონიკები.

ღრძს. მაშინ დამამაგნიტებელი ძალის სწორკუთხედის პირველი სივრცული ჰარმონიული მდგენელის განტოლება დროის აღებულ მომენტში შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს შემდეგი სახით (ნახ. 343).

$$\Theta_{1x} = \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_e \cdot \cos \frac{x\pi}{\tau} \quad (24,3)$$

სადაც τ — საპოლუსო დანაყოფია, ხოლო Θ_e — დამამაგნიტებელი ძალის სწორკუთხედის სიმაღლეა დროის აღებულ მომენტში:

ასეთნაირადვე 3, 5, 7 და ა. შ. ჰარმონიკებისათვის მივიღებთ:

$$\Theta_{3x} = \frac{1}{3} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_e \cos \frac{3x\pi}{\tau};$$

$$\Theta_{5x} = \frac{1}{5} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_e \cdot \cos \frac{5x\pi}{\tau};$$

$$\Theta_{vx} = \frac{1}{v} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_e \cdot \cos \frac{vx\pi}{\tau}.$$

დაევშევბთ რა $\Theta_e = \Theta_m \sin \omega t$, სადაც $\Theta_m = \frac{I_m \cdot \omega t}{2}$, პირველი ჰარმონიული მდგენელისათვის მივიღებთ:

$$\Theta_{1x} = \frac{4}{\pi} \Theta_m \sin \omega t \cos \frac{x\pi}{\tau} \quad (24,4)$$

შემდეგ ტრიგონომეტრიული გარდაქმნით მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \Theta_{1x} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_m \sin \left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \Theta_m \sin \left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau} \right) = \\ &= \Theta_{1x} \sin \rho + \Theta_{1x} \sin \rho \end{aligned} \quad (24,5)$$

რადგანაც, როგორც ცნობილია,

$$\sin \omega t \cdot \cos \frac{x\pi}{\tau} = \frac{1}{2} \sin \left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} \right) + \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau} \right).$$

თითოეული ზემოთ მიღებული მდგენელი წარმოადგენს დამამაგხიტებელი ძალის საპეროდულ რეჟიმს გასწვრივ მრბენ სინუსოიდურ ტალღას. ტალღების მოძრაობის სიჩქარე განისაზღვრება განტოლებიდან:

$$\omega t + \frac{x\pi}{\tau} = 0 \quad \text{და} \quad \omega t - \frac{x\pi}{\tau} = 0.$$

აქედან:

$$v_{\text{ობ}} = \frac{x}{t} = -\frac{\omega\tau}{\pi} = -2\tau f \quad (24,6)$$

და

$$v_{\text{ნპ}} = \frac{\omega\tau}{\pi} = +2\tau f. \quad (24,7)$$

ამგვარად: დამამაგხიტებელი ძალი უძრავი სინუსოიდური კულსიური ტალღა შეიძლება წარმოვიდგინოთ საწინააღმდეგო მიმართულებით მრბენი ორი ტალღის სახით.

რადგანაც ხაზური სიჩქარე $v = \frac{\pi D n}{60}$, ხოლო $\tau = \frac{\pi D}{2p}$, ამიტომ ამ

ტალღების სიჩქარე შესაძლებელია გამოსახულ იქნეს წუთში ბრუნვათა რიცხვის საშუალებით:

$$n_{\text{ნპ}} = \frac{60f}{p} \quad \text{და} \quad n_{\text{ობ}} = -\frac{60f}{p}.$$

ანალოგიურად შესაძლებელია განისაზღვროს მოძრაობის სიჩქარე ნებისმიერი სივრცული ჰარმონიული მდგენელისათვისაც, მაგრამ ეს სიჩქარეები v -ჯერ ნაკლები იქნება (v ჰარმონიკისათვის). მართლაც, (24,4) განტოლებების ანალოგიურად ნებისმიერი v ჰარმონიკისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{მ}} &= \frac{1}{v} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_{\text{მ}} \sin \omega t \cos \frac{vx\pi}{\tau} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_{\text{მ}} \sin \left(\omega t + \frac{vx\pi}{\tau} \right) + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_{\text{მ}} \sin \left(\omega t - \frac{vx\pi}{\tau} \right). \end{aligned} \quad (24,8)$$

შესაბამისად

$$v_{\text{ობ}} = -\frac{1}{v} \cdot 2\tau f; \quad (24,9)$$

$$v_{\text{ნპ}} = +\frac{1}{v} \cdot 2\tau f, \quad (24,10)$$

$$u_{\text{ორპ}} = -\frac{1}{\nu} \cdot \frac{60f}{p}; \quad u_{\text{ერპ}} = +\frac{1}{\nu} \cdot \frac{60f}{p}.$$

თუ კოქას ხვევებში დენი არასინუსოიდურია დროის მიხედვით და შეიცავს k რიგის ჰარმონიულ მდგენელს, წარმოიშევა ჰარმონიული ტიპის ახალი მრბენი ტალღები:

$$\begin{aligned} \Theta_{\nu} &= \frac{1}{\nu} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_{mk} \sin k\omega t \cdot \cos \frac{\nu x \pi}{\tau} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\nu} \cdot \frac{4}{\pi} \Theta_{mk} \sin \left(k\omega t + \frac{\nu x \pi}{\tau} \right) + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\nu} \cdot \frac{4}{\pi} \Theta_{mk} \sin \left(k\omega t - \frac{\nu x \pi}{\tau} \right), \end{aligned} \quad (24,11)$$

სადაც $\Theta_{mk} = \frac{I_{mk} \omega t}{2}$ — k რიგის ჰარმონიკის სრული დენის ამპლიტუდაა.

ეს ტალღები გარბიან სიჩქარეებით:

$$v_{\text{ერპ}} = \frac{k}{\nu} \cdot 2\tau f \quad (24,12)$$

და

$$v_{\text{ორპ}} = -\frac{k}{\nu} \cdot 2\tau f; \quad (24,13)$$

როდესაც $k = \nu$, მაშინ ასეთი ტალღების სიჩქარე ძირითადი ტალღის სიჩქარის ტოლი იქნება. თუ k ჰარმონიული რიგის დენი, დროის მიხედვით შეტია დამამაგნიტებელი ძალის მრუდის სივრცული ν ჰარმონიკის რიგზე, მაშინ შესაბამისი დამამაგნიტებელი ძალის ტალღები იბრუნებენ უფრო სწრაფად, ვიდრე ძირითადი ტალღა. პირიქით, როდესაც $k < \nu$, სიჩქარე v_{ν} ძირითადი ტალღის სიჩქარეზე ნაკლები იქნება (იხ. ცხრ. 18).

ცხრილი 18

$n_{\text{კე}}$ როდესაც $f=50\text{Hz}$ და $2p=2$

ν/k	1	3	5	7	9	11	13
1	3 000	000	600	429	338	273	231
3	9 000	000	1 800	1 286	1 000	818	692
5	15 000	000	3 000	2 143	1 667	1 364	1 156
7	21 000	7 000	4 200	3 000	2 333	1 909	1 616
9	27 000	9 000	5 400	3 857	3 000	2 455	2 077
11	33 000	11 000	6 600	4 714	3 667	3 000	2 546
13	39 000	13 000	7 800	5 571	4 333	3 545	3 000

დამამაგნიტებელი ძალის საპერო ღრეჩოში მრბენი სინუსოიდური ტალღები შეიძლება მოხერხებულად წარმოვიდგინოთ სივრცული ვექტორების სახით, რომელთა მიმართულება ემთხვევა დამამაგნიტებელი ძალის ტალღის მაქსი-

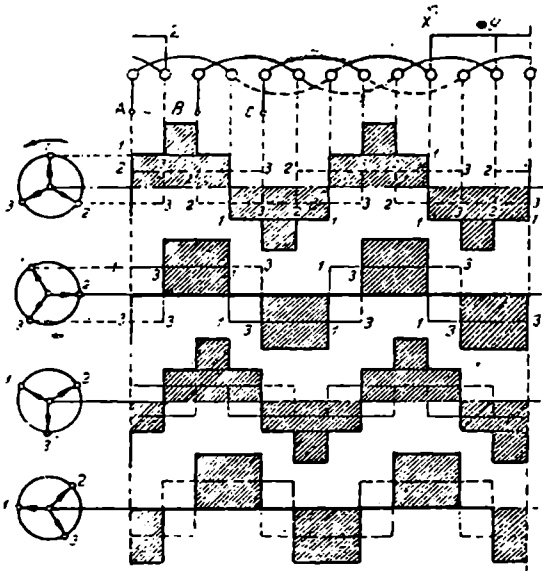
მუშის მდებარეობას. ტალის გადაადგილება 2ϵ მანძილზე შეესაბამება დამამაგნიტებელი ძალის სივრცული ვექტორის მობრუნებას 2π კუთხით. თუ მაგალითად საპაერო ღრეჩოში ტოლი სიჩქარით მოძრაობს დამამაგნიტებელი ძალის ორი ან რამდენიმე ტალა, მაშინ მათი სივრცული ვექტორების შეკრებით ადვილად მივიღებთ რეზულტიური ტალის ამპლიტუდას და მის სივრცულ ორიენტაციას.

გ) ერთკოქა სამფაზა გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალა. ამ შემთხვევაში ყოველ წყვილ პოლუსზე გვაქვს სივრცეში ერთიმეორისისაგან $2/3\pi$ მანძილით დაძრული სამი კოქა. კოქებში ვადის სამფაზა დენი, ამასთან ყოველი კოქა წარმოადგენს გრაგნილის დამოუკიდებელ ფაზას.

ბუნებრივია, რომ ყველა კოქას ან ფაზის მაგნიტომამოძრავებელი ძალები ჯამდება და ქმნის დამამაგნიტებელი ძალის რეზულტიურ მრუდს. ნახ. 344-ზე ნაჩვენებია ასეთი გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი დროის ოთხი მომენტისათვის. მრუდის აგების წესი ნათელია ნახაზიდან. ნახ. 344-დან

ჩანს, რომ რეზულტიური მრუდი წარმოადგენს მრბენ საფეხურებიან ტალას, რომელიც იცვლის თავის ფორმას. ამ ტალის ანალიზი შეიძლება მოვახდინოთ უკვე აღწერილი ხერხით, ფურჩის მწკრივის საშუალებით.

წარმოვიდგენთ რა რეზულტიურ ტალას როგორც ცალკეულ კოქების მიერ შექმნილი სამი მდგარი ტალის ჯამს, და თავის მხრივ დავშლით თითოეულ ტალას პარამონიულ მდგენელებად, უკანასკნელთა შემდგომი დაშლით ორ



ნახ. 344.

საწინააღმდეგო მიმართულებით მრბენ ტალელებად, ჩვენ მივიღებთ მბრუნავი ტალელების რიგს, რომლებიც შესაძლებელია დაჯგუფდეს სამ ჯგუფად:

პირველი ჯგუფი (პირ და პირი)—ტალეები, რომლებიც ბრუნავენ დადებითი მიმართულებით $2\pi f$ სიჩქარით. ამ ტალეების სიგრძე უდრის 2ϵ .

მეორე ჯგუფი (ინვერსიული)—ტალეები, რომლებიც იგივე სიჩქარით ბრუნავენ, მხოლოდ საწინააღმდეგო მიმართულებით. ამ ტალეების სიგრძეც ტოლია 2ϵ .

მესამე ჯგუფი (უმაღლესი კარმონიკების) ტალღები, რომლებიც ბრუნავენ, როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი მიმართულებით, სიჩქარით, $v \approx 2v$. შევადგინოთ რა ასეთ ჯგუფებს, ადვილად დაინახავთ, რომ დენის სიმეტრიული სისტემის ფაზების მოცემული მიმდევრობისას სამფაზა გრაგნილში ტალღების პირველი ან მეორე ჯგუფი ჯამში ნულის ტოლია. ასეთივე მდგომარეობაში აღმოჩნდება მესამე ჯგუფის ტალღების უდიდესი ნაწილი.

მართლაც, შევკრებთ რა პირველ ჯგუფს სამივე A, B, C ფაზებისათვის და: დაეუშვებთ $\nu=1$ და $k=1$, მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \Theta_{110}e^{jA} + \Theta_{110}e^{jB} + \Theta_{110}e^{jC} &= \frac{1}{2} \frac{4}{\pi} \Theta_m \sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right) + \\ &- \frac{1}{2} \frac{4}{\pi} \Theta_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{1}{3}T\right) - \frac{\left(x - \frac{2}{3}\tau\right)\pi}{\tau}\right] + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{4}{\pi} \Theta_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{2}{3}T\right) - \frac{\left(x - \frac{4}{3}\tau\right)\pi}{\tau}\right] = \\ &= 3 \cdot \frac{1}{2} \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_m \sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right), \end{aligned} \quad (24,14)$$

ვიხილავ

$$\frac{1}{3}\omega T = \frac{1}{3}2\pi = \frac{2}{3}\frac{\tau\pi}{\tau}.$$

(24,14)-ის ანალიზიდან ადვილად მტკიცდება, რომ რეზულტიური დამამაგნიტებელი ძალის ღერძი ყოველთვის ემთხვევა იმ ფაზის ღერძს, სადაც დროის ამ მომენტში დენი მაქსიმუმია (იხ. ნაწ: I, § 4, ბ).

მეორე ჯგუფისათვის მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \Theta_{110}e^{jA} + \Theta_{110}e^{jB} + \Theta_{110}e^{jC} &= \frac{1}{2} \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_m \sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau}\right) + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{4}{\pi} \Theta_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{1}{3}T\right) + \frac{\left(x - \frac{2}{3}\tau\right)\pi}{\tau}\right] + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{4}{\pi} \Theta_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{2}{3}T\right) + \frac{\left(x - \frac{4}{3}\tau\right)\pi}{\tau}\right] = \frac{1}{2} \frac{4}{\pi} \Theta_m \left\{ \sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau}\right) + \right. \\ &\left. + \sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} - \frac{2}{3}2\pi\right) + \sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} - \frac{4}{3}2\pi\right) \right\} = 0, \end{aligned}$$

რადგანაც ფიგურულ ფრჩხილებში მოთავსებული ჯამი შესაბამეა სამი ერთი-მეორის მიმართ 120° -ით დაძრული სიმბოლური ერთეული ვექტორის დროის ღერძზე პროექციების ჯამს.

ამგვარად. ტალღების პირველი ჯგუფი გვაძლევს რეზულტიურ ტალღას, რომელიც წარმოადგენს ძირითად მუშა ტალღას და ქმნის მანქანის პირდაპირ მბრუნავ მაგნიტურ არეს.

ამ ტალღის ამპლიტუდა ტოლია

$$\Theta = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \Theta_m = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}lw}{2p} = 1,35 \frac{lw}{p}, \quad (24,15)$$

სადაც l ფაზის დენის ეფექტური მნიშვნელობაა, ხოლო $\frac{w}{2p}$ ფაზის ხვევთა რიცხვია, რომელიც მოდის ერთ პოლუსზე.

ანალოგიურად შეიძლება დავამტკიცოთ, რომ საერთო შემთხვევაში m -ფაზა გრაგნილისათვის რეზულტიური ტალღის ძირითადი ჰარმონიკის ამპლიტუდა ტოლი იქნება:

$$\Theta = \frac{m}{2} \frac{4}{\pi} \Theta_m = \frac{m}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}lw}{2p} = 0,45m \frac{lw}{p}. \quad (24,16)$$

შეორე ჯგუფი წარმოადგენს ინვერსიულ ტალღას, რომელიც სიმეტრიულ სამფაზა სისტემაში ნულად იქცევა.

შესაბამე ჯგუფი იყოფა შემდეგ ქვეჯგუფებად:

ა) ჰარმონიკები, რომლებმაც თვისაც k ან ν სამის ჯერადია. სიმეტრიულ სამფაზა სისტემაში ტალღების ეს კარტეგორია იქცევა ნულად ჯერ კიდევ თავის პულსიურ ფორმაში.

პართლაც:

$$\begin{aligned} \Theta_{1\nu_A} + \Theta_{1\nu_B} + \Theta_{1\nu_C} &= \frac{1}{\nu} \frac{4}{\pi} \Theta_m \left[\sin k\omega t \cos \frac{\nu\pi}{\tau} + \right. \\ &+ \sin \left(k\omega t - \frac{k}{3} 2\pi \right) \cdot \cos \left(\frac{\nu\pi}{\tau} - \frac{\nu}{3} 2\pi \right) + \\ &\left. + \sin \left(k\omega t - \frac{2k}{3} 2\pi \right) \cos \left(\frac{\nu\pi}{\tau} - \frac{2\nu}{3} 2\pi \right) \right]. \end{aligned}$$

როდესაც k სამის ჯერადია

$$\begin{aligned} \Theta_{1\nu_A} + \Theta_{1\nu_B} + \Theta_{1\nu_C} &= \\ = \frac{1}{\nu} \frac{4}{\pi} \Theta_m \sin k\omega t \left[\cos \frac{\nu\pi}{\tau} + \cos \nu \left(\frac{\pi}{\tau} - \frac{1}{3} 2\pi \right) + \cos \nu \left(\frac{\pi}{\tau} - \frac{2}{3} 2\pi \right) \right] &= 0. \end{aligned}$$

როდესაც ν სამის ჯერადია

$$\begin{aligned} \Theta_{1\nu_A} + \Theta_{1\nu_B} + \Theta_{1\nu_C} &= \\ = \frac{1}{\nu} \frac{4}{\pi} \Theta_m \cos \frac{\nu\pi}{\tau} \left[\sin k\omega t + \sin k \left(\omega t - \frac{1}{3} 2\pi \right) + \sin k \left(\omega t - \frac{2}{3} 2\pi \right) \right] &= 0. \end{aligned}$$

ბ) ჰარმონიკები, რომლებმაც თვისაც k და ν სამის ჯერადია. ამ შემთხვევაში

$$\Theta_{1\nu_A} + \Theta_{1\nu_B} + \Theta_{1\nu_C} = \frac{3}{\nu} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \Theta_m \sin k\omega t \cdot \cos \frac{\nu\pi}{\tau},$$

ე. ი. ვლებულობთ საერთო მდგარ პულსიურ k ტალღას, რომელიც თავის მხრივ იძლევა პირდაპირ და უკუ ტალღებს, მათი გადაადგილების სიჩქარე დამოკიდებულია $\frac{k}{v}$ ფარდობაზე [(24,11)–(24,13)].

გ) პარამონიკები, რომელთათვის $k=v$. ეს ქვეჯგუფი გვაძლევს ტალღას, რომელიც გადაადგილდება სივრცეში ძირითადი ტალღის ($v=2\pi f$) სიჩქარით და იგივე მიმართულებით.

დ) პარამონიკები, რომელთათვისაც $k \neq v$ და ანასთან არც k და არც v არ ირის სამის ჯერადი. ეს პარამონიკები ქმნიან პულსიურ ტალღებს, რომლებიც მრბენ ტალღებად დაშლის და შეჯამების შემდეგ გვაძლევს პირდაპირ ან უკუ ტალღას, ვინაიდან ყოველთვის $v-k$ ან $v+k$ სამის ჯერადია. პართლაც

$$\begin{aligned} & 2 \left\{ \sin k\omega t \cdot \cos v \frac{x\pi}{\tau} + \sin k \left(\omega t - \frac{1}{3} 2\pi \right) \cos v \left(\frac{x\pi}{\tau} - \frac{1}{3} 2\pi \right) \right\} + \\ & + \sin k \left(\omega t - \frac{2}{3} 2\pi \right) \cdot \cos v \left(\frac{x\pi}{\tau} - \frac{2}{3} 2\pi \right) \Big\} = \\ & = \sin \left(k\omega t - \frac{v x \pi}{\tau} \right) + \sin \left(k\omega t - \frac{v x \pi}{\tau} + \frac{v-k}{3} 2\pi \right) + \\ & + \sin \left(k\omega t - \frac{v x \pi}{\tau} + 2 \frac{v-k}{3} 2\pi \right) + \sin \left(k\omega t + \frac{v x \pi}{\tau} \right) + \\ & + \sin \left(k\omega t + \frac{v x \pi}{\tau} - \frac{v+k}{3} 2\pi \right) + \\ & + \sin \left(k\omega t + \frac{v x \pi}{\tau} - 2 \frac{v+k}{3} 2\pi \right). \end{aligned}$$

აქედან ჩანს, რომ თუ სხვაობა $v-k$ სამის ჯერადია, მაშინ იკრიბება პირდაპირი ტალღები, ხოლო უკუ ტალღები იქცევა ნულად. თუ პირიქით, $v+k$ სამის ჯერადია, მაშინ იკრიბება უკუ ტალღები, ხოლო პირდაპირი ტალღები ჯამში გვაძლევს ნულს. ეს შეიძლება ახსნილი იქნეს იმითაც, რომ ნებისმიერი k პარამონიკა წარმოადგენს უკუ მიმდევრობის სისტემას, თუ $v+k$ სამის ჯერადია, ხოლო პირდაპირი მიმდევრობის სისტემას, თუ სხვაობა $k-v$ სამის ჯერადია.

ცხრ. 19-ში ნაჩვენებია დამამაგნიტებელი ძალის უმაღლესი პარამონიკების ტალღების მოძრაობის მიმართულება. დადებითი მიმართულება აღნიშნულია (+), ხოლო საწინააღმდეგო მიმართულება (-). თუ შესაბამის ლჯრედში არაა დასმული ნიშანი, ეს იმას ნიშნავს, რომ დამამაგნიტებელი ძალის მოცემული რიგის ტალღები არ არსებობს.

ღ) ხამფაზა ერთფენა გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალა ღრმულთა მთელი q რიცხვით პოლუსზე და ფაზაზე. ეს შემთხვევა წინა შემთხვევისაგან განსხვავდება მხოლოდ იმით, რომ ერთი ჯგუფის და ქვეჯგუფის ტალღების შეჯამების დროს მხედველობაში უნდა მივიღოთ ერთი ფაზის ცოკებს შორის უაზათა ძვრა ერთი წყვილი პოლუსის ფარგლებში.

სამფაზა გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალის ტალღების მოძრაობის მიმართულება

γ/k	1	3	5	7	9	11	13
1	+			+			+
3	+	±			±	-	
5	-		+	-		+	-
7	+		-	+		-	+
9		±			±		
11	-		-	-		+	-
13	+		-	+		-	+

ვინაიდან სინუსოიდები იკრიბება, ამიტომ შედეგად ვიღებთ სინუსოიდებსევე, რომლებიც შეესაბამება გეომეტრიულ ჯამს. ჩვენ შეგვიძლია ვისარგებლოთ იმავე ხერხით, როგორც ე. მ. ძ.ების შეკრების დროს, ე. ი. შემოვიღოთ განაწილების კოეფიციენტის ცნება დამამაგნიტებელი ძალებისათვის (ნაწ. III, § 22).

$$k_{pv} = \frac{\sin q \frac{\gamma x}{2}}{q \sin \frac{\gamma x}{2}}$$

სადაც α , რომელიც გამოსახულია ელექტრულ გრადუსებში, შეესაბამება საკბილო ბიჯს. წინათ მოყვანილის თანახმად, სამფაზა გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალის γ რიგის მრბენი ტალღის სივრცული პარამონიკის ამპლიტუდა ტოლია:

$$\Theta v = \frac{3}{2} \frac{k_{pv}}{\gamma} \frac{4}{\pi} \Theta_{mk} = 1,35 \frac{k_{pv}}{\gamma p} I_{kx}, \quad (24,17)$$

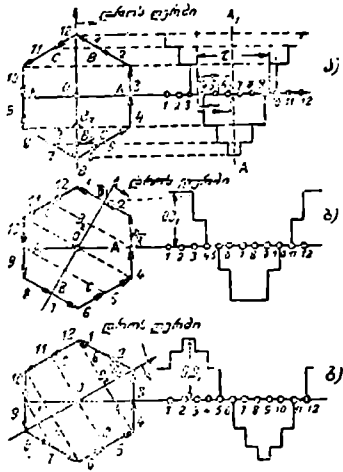
სადაც I_k დენის k პარამონიკის ეფექტური მნიშვნელობაა. ანალოგიურად m ფაზა გრაგნილისათვის მივიღებთ:

$$\Theta v = 0,45 m \frac{k_{pv}}{\gamma p} I_{kx}. \quad (24,18)$$

ხშირად სასურველია გრაფიკულად წარმოვიდგინოთ დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი ტალღების რიგად დაშლის გარეშე. ამისათვის შეიძლება ვისარგებლოთ იმავე მეთოდით, რომლითაც ნახ. 344-ზე აგებული იყო დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი. მაგრამ უფრო მოსახერხებელია გიორგესის (H. Görgeš) მიერ მოცემული მეთოდი. ამ მეთოდის არსის ცხადყოფა ყველაზე ადვილია კონკრეტულ მაგალითზე.

განვიხილოთ სამფაზა გრაგნილი, სადაც $q=2$. ორ პოლუსზე მოსული ღრმულთა რიცხვი ტოლი იქნება $2mq=12$. სიმეტრიული დატვირთვის დროს ამ ღრმულებში სრული დენების ვექტორები ჰქმნიან წესიერ ექვსკუთხედს, ე. წ. გიორგესის პოლიგონს (ნახ. 345)- ავირჩიოთ დროის მომენტი, როდესაც A ფაზაში დენს აქვს მაქსიმალური მნიშვნელობა. ამ მომენტში დროის ღერძი ვერტიკალურ მდგომარეობაშია, რეზულტიური დამამაგნიტებელი

ტალის ამპლიტუდა დაემთხვევა A ფახის $A_1 - A_1$ ღერძს. როგორც ნახ. 345, ა-დან ჩანს, ამ ღერძის ვისწვრივ კბილის მთელ სიგანეზე შეექვს და შევი. დე ღრმულებს შორის მოქმედებს დამამაგნიტებელი ძალა, რომელიც 4,5 და 6 ღრმულების სრული ღენების მყისა მნიშვნელობების ჯამის OB_1 პროექციის ტოლია. ანალოგიურად 5 და 6 ღრმულებს შორის მოქმედებს დამამაგნიტებელი ძალა, რომელიც 4 და 5 ღრმულების სრული ღენების მყისა მნიშვნელობების ჯამის ე. ი. OB_2 პროექციის ტოლია და ა. შ. აქედან გამომდინარეობს დამამაგნიტებელი ძალის მრუდის აგების წესი: OB_1, OB_2, OE_2 და პოლიგონის სხვა m და n ვექტორების შეხების წერტილების პროექციები დროის ღერძზე გადააქვთ განილი საპარო ღრეჩოს კბილთა ზონაში m და n ღრმულებს შორის და ამგვარად აგებენ დამამაგნიტებელი ძალის სრულ საფეხურებიან მრუდს, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 345-ზე.



ნახ. 345.

ნახ. 315, ბ და 345, გ-ზე განხორებულია მრუდის აგება დროის ღერძის სხვა ორი მდებარეობისათვის.

ე) სამუაზა ორფენა გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალა ღრმულთა მთელი q რიცხვით პოლუსზე და ფაზაზე.

ლიამეტრალურბიჯიანი ორფენა გრაგნილები, როდესაც q მთელი რიცხვია, დამამაგნიტებელი ძალების მხრივ არაფრით არ განსხვავდება ერთფენა გრაგნილებისაგან და წარმოადგენს მოლოდ კოქების რიცხვის გაორკეცების ხერხს ორი აქტიური მზარის ერთ ღრმულში განლაგებით.

ბიჯის შემოკლების გავლენა განხილული იქნება ქვემოთ.

ვ) ორფენა გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალა შემოკლებული ბიჯის შემთხვევაში. შემოკლებული ბიჯის გამოყენების შემთხვევაში ორფენა გრაგნილი კოქებისათვის დამამაგნიტებელი ძალის მრუდის ანალიზის მეთოდი და აგების წესები რჩება ისევე, როგორც წინადა.

როგორც უკვე იყო ნაჩვენები ნაწ. III, § 23 ორფენა გრაგნილი შემოკლებული ბიჯით წარმოადგენს ერთმანეთის მიმართ $(1-\beta)\tau$ კუთხით დაძრული ორი დამეტრალური გრაგნილის ერთობლიობას; ორი ფენის დამამაგნიტებელი ძალების გეომეტრიული შეკრება შეიძლება მოვახდინოთ ორფენა დამეტრალურბიჯიანი გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალის თითოეული ჰარმონიკის ამპლიტუდის გამრავლებით ბიჯის შემოკლების კოეფიციენტზე:

$$k_{\nu\nu} = \sin \nu \cdot \frac{y}{\tau} - \frac{\pi}{2}$$

ჩვეულებრივად, ორფენა გრაგნილს ისეთნაირად ასრულებენ, რომ შემოკლების კოეფიციენტი, რომელიც დამამაგნიტებელი მაგნიტომამოძრავებელი ძალის მრუდში შკვეთრადაა გამოვლინებული, უმაღლესი პარამონიკისათვის იყოს მცირე ან ნულის ტოლი. მაგალითად, როდესაც $y = \frac{4}{5}\tau$, $k_{y_1} = 0$,

როდესაც

$$y = \frac{6}{7}\tau, \quad k_{y_2} = 0.$$

და ა. შ.

ამის განო ორფენა გრაგნილებიან მანქანებში შემოკლებული ბიჯის შემთხვევაში რეზულტიური დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი უფრო ახლოსაა სინუსოიდასთან, ვიდრე მაშინ, როდესაც ბიჯი დიამეტრალურია.

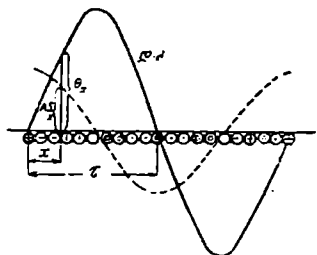
(24,17)-ის თანახმად, დამოკლებულბიჯიანი ორშრიანი გრაგნილის V -პარამონიული სივრცითი HC ტალღის ამპლიტუდა ტოლია:

$$\Theta_v = 1,35 k_{pv} k_{yv} \frac{I_{kv}}{vp} = 1,35 k_{mv} \frac{I_{kv}}{vp} \quad (24,19)$$

და შესაბამისად m ფაზის გრაგნილისათვის

$$\Theta_v = 0,45 m \cdot k_{av} \frac{I_{kv}}{vp}. \quad (24,20)$$

ზ) გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალა, როდესაც ფაზათა რიცხვი ძალზე დიდია. ასეთი გრაგნილის პრაქტიკულ მაგალითს წარმოადგენს მოკლედ



შერთული გრაგნილი ციყვის ბორბლის სახით ასინქრონული ძრავების როტორებისათვის.

სამუშაო გრაგნილების ზემოთ განხილული შემთხვევა, როდესაც q მთელი რიცხვია, ადვილად შეიძლება გაერკუდეს გრაგნილებზე ძალზე დიდი m -ით.

საქიროა ჯერ დავამტკიცოთ, რომ ძალზე დიდი m -ის შემთხვევაში ადგილი არ ექნება როგორც უმაღლეს პარამონი-

ნახ. 346. გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი, როდესაც ფაზათა რიცხვი ძალზე დიდია. ში, ასევე პირველი რიგის ინვერსიულ ტალღას.

მართლაც, ასეთი სისტემა შეიძლება განხილულ იქნეს როგორც სამფაზა, ხუთფაზა, შვიდფაზა და ა. შ. სისტემების სიმრავლეთა ერთობლიობა, მაგრამ ამ მსჯელობის დროს თანდათან მივალთ იმ დასკვნამდე, რომ არ არსებობენ არც შესაბამე, არც მეხუთე, არც მეშვიდე და ა. შ. პარამონიკები.

იგივეს მივიღებთ პირველი რიგის ინვერსიული არესათვის.

ამგვარად, ფაზათა დიდი რიცხვის შემთხვევაში შეიქმნება დამამაგნიტებელი ძალის მხოლოდ ერთი სინქრონულად მრბენი სინუსოიდური ტალღა (ნახ. 346), რომლისთვისაც, ბუნებრივია, მთლიანად სამართლიანია განტოლება (24,2).

დავუშვებთ რა, რომ

$$AS_x = \frac{m \cdot 2\omega l V \sqrt{2}}{2\pi p} \cos \frac{x\pi}{\tau},$$

სადაც x ერთი ფაზის ხვიათა რიცხვია, გვექნება.

$$Q_x = \int_0^x \frac{m\omega l V \sqrt{2}}{\pi p} \cos \frac{x\pi}{\tau} dx = \frac{m \cdot \omega}{p \cdot \pi} l V \sqrt{2} \sin \frac{x\pi}{\tau}. \quad (24,21)$$

თ) ხამფაზა ორფენა გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალა, როდესაც q ძალზე დიდია. ასეთი გრაგნილის ყოველი ფაზისათვის დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი ტრაპეციოიდური ფორმისაა (ნახ. 347). სამივე ფაზის რეზულტიური დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი ამ შემთხვევაში დროის სხვადასხვა მომენტისათვის ხან ტრაპეციოიდური, ხან კი წაწვეტებული მრუდის სახისაა.

დამამაგნიტებელი ძალის ტალღის ამპლიტუდის გამოთვლისას, საჭიროა შევიტანოთ გრაგნილის კოეფიციენტი, რომელიც ამ შემთხვევაში ისეთივეა, როგორც თანაბრად განაწილებული გრაგნილისათვის (ნაწ. III, § 22, დ).

$$k_p = \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\frac{\beta}{2}} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = \frac{3}{\pi} = 0,955.$$

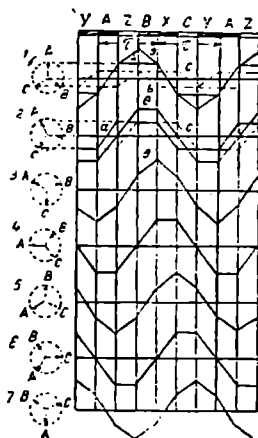
ამიტომ (24, 19)-ის თანახმად პირველი ჰარმონიკის ამპლიტუდა ტოლია:

$$Q_1 = 1,35 \cdot 0,955 \frac{l_1 \omega m}{p} = 1,29 \frac{l_1 \omega}{b}. \quad (24,22)$$

ა) საერთო დასკვნები. ცვლადი დენის გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალების ზემოთ მოყვანილი ანალიზიდან შესაძლებელია გაეაკეთოს შემდეგი საერთო დასკვნები:

1) გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალა, როგორც წესი, არასინუსოიდურადაა განაწილებული საჭირო ღრუხოს გარშემოწერილობის გასწვრივ.

2) დროის ყოველი მოცემული მომენტისათვის ფაზებში დენების მყისა მნიშვნელობების შესაბამისად, შესაძლებელია ავებულ იქნეს დამამაგნიტებ-



ნახ. 347. ორფენა სამფაზა გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი დიდი q შემთხვევაში.

ლი ძალის მრუდი, რომლის ფორმა, გრაგნილის ღრმულებში განაწილების გამო, საფეხურებიანია.

ერთეულზე გრაგნილებში ეს მრუდი პულსირებს დროის მიხედვით, ინარჩუნებს რა თავის ფორმას. მრავალეულზე გრაგნილებში დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი გადაადგილდება სპაერო ღრეჩოს გასწვრივ ამა თუ იმ მიმართულებით იმის მიხედვით, თუ როგორია დენების ფაზების მიმდევრობა, პერიოდულად იცვლის რა საფეხურიან ფორმას.

3) დამამაგნიტებელი ძალის სივრცული განაწილების მრუდის ანალიზი მოსახერხებელია ფურიეს მწკრივების საშუალებით. ზოგად შემთხვევაში დამამაგნიტებელი ძალის სივრცული განაწილება შესაძლებელია წარმოდგენილი იქნეს სპაერო ღრეჩოს გასწვრივ მრბენი სივრცული სინუსოიდური ტალღების სახით. ძირითადი ტალღა მოძრაობს დამამაგნიტებელი ძალის რეზულტიური ტალღის მიმართულებით და სიჩქარით აქვს 2π -ს ტოლი პერიოდი. ვარდა ამისა, ზოგიერთ შემთხვევაში გვაქვს დამამაგნიტებელი ძალის ინვერსიული ტალღა, რომლის პერიოდია 2π და რომელიც ბრუნავს ძირითადი ტალღის სიჩქარით, მხოლოდ საწინააღმდეგო მიმართულებით. შესაძლებელია აგრეთვე ადგილი ჰქონდეს სხვადასხვა სიჩქარით მრბენ მთელ რიგ პირდაპირ და ინვერსიულ ტალღებს, რომელთა პერიოდია $2\frac{\pi}{y}$. ამ ტალღათაგან ზოგიერთი შეიძლება მოძრაობდეს

ძირითად პირდაპირ, ან ძირითად ინვერსიულ ტალღასთან სინქრონულად.

4) როგორც შემდეგში იქნება ნაჩვენები, მანქანის მუშაობის ანალიზის მრავალ შემთხვევაში საკმარისია მხედველობაში მივიღოთ დამამაგნიტებელი ძალის მხოლოდ პირდაპირი და ინვერსიული (ე. ი. ძირითადი სივრცული ჰარმონიკები) ტალღები.

25. დანაკარგები და მ. ძ. ძ.

როგორც ადრე იყო დადგენილი (ნაწ. 1, § 1) ელექტრული მანქანის მუშაობა ყოველთვის დაკავშირებულია ენერჯის დანაკარგებთან, რომლებზედაც დამოკიდებულია მანქანის მ. ძ. კ. და მისი გაზურება.

ანგარიშის დროს დანაკარგებს ჩვეულებრივად ოთხ ჯგუფად ყოფენ:

1) გ რ ა გ ნ ი ლ ე ბ ი ს დ ა ნ ა კ ა რ გ ე ბ ი ს პ ი ლ ე ნ ძ შ ი, რომლებიც გამოწვეულია ამ გრაგნილებში დენის გავლით.

2) დ ა ნ ა კ ა რ გ ე ბ ი ფ ო ლ ა დ შ ი ჰ ის ტ რ ე ზ ის ზ ე და ფ უ კ ო ს დ ე ნ ე ბ ზ ე, რომლებსაც ადგილი აქვს ცვლადი მაგნიტური არეს მოქმედების გამო.

3) მ ე ქ ა ნ ი კ უ რ ი დ ა ნ ა კ ა რ გ ე ბ ი, რომლებიც შედგება დანაკარგებისაგან ხახუნზე და საკისრებში, პუსებსა და საკონტაქტო რგოლებს ან კოლექტორს შორის ხახუნზე. მათვე მიეკუთვნება სავენტილაციო დანაკარგები, რომლებიც ვენტილატორის ბრუნვაზე და როტორის ბრუნვის დროს ჰაერის წინააღმდეგობის დასაძლევად დახარჯული სიმძლავრის ტოლია.

4) ე გ რ ე თ წ ო დ ე ბ უ ლ ი დ ა მ ა ტ ე ბ ი თ ი დ ა ნ ა კ ა რ გ ე ბ ი. მათ ეკუთვნის დანაკარგები, რომელთა რაოდენობრივი აღრიცხვა შეუძლებელია. განისაზღვრება როგორც სხვაობა მანქანის რეალურ დანაკარგებსა და იმ დანაკარგების ჯამს შორის, რომელთა ცალკეული განსაზღვრა შესაძლებელია.

ეს დანაკარგები იქმნება მანქანის მაგნიტურ სისტემაში ან სხვა რომელიმე ნაწილში და დაკავშირებულია დამატებით აღურიცხვებულ კულსაციასთან, რომელსაც განიცდის მუშა ნაკადის არე და ფანტვის არეები. მათ ადგილი აქვთ სპილენძში ფუკოსა და კოჰუტაციის დენებისაგან და ბოლოს, მანქანის იზოლაციაში ელექტრული არეს მოქმედებით.

ა) დანაკარგები სპილენძში. სიმძლავრის დანაკარგები გრაგნილში გამოითვლება ჯოჯის კანონის თანახმად:

$$P_{\mu} = I^2 r \quad (25,1)$$

სადაც აქტიური წინააღმდეგობა r განისაზღვრება ფორმულით:

$$r = k \frac{\omega l_{\mu}^2}{s} \cdot \frac{234,5 + \theta}{234,5 + \theta_0} \quad (25,2)$$

სადაც ω — გრაგნილას მიმდევრობით შეერთებულ ხვევთა რიცხვია, l_{μ} — ხვევის საშუალო სიგრძეა მ-ში, θ — ხვევის გამტარის კვეთი მმ²-ში, θ_0 — გრაგნილის ტემპერატურა, რომლის დროსაც განისაზღვრება r , ρ — გამტარის ხვედრითი წინააღმდეგობა მ² ტემპერატურისათვის $\frac{\Omega \text{მმ}^2}{\text{მ}}$ ში.

k კოეფიციენტი, რომელსაც ფილდას კოეფიციენტს უწოდებენ, აღრიცხვის მანქანის გრაგნილების სპილენძში გრიგალისებური დენებით გამოწვეულ დანაკარგებს. გრიგალისებური დენები „ჯამდება“ რა მუშა ცვლად დენთან, არღვევს სიმკერვის თანაბარ განაწილებას გამტარების კვეთში, და ამით ზრდის დანაკარგებს.

ეს მოვლენა პირველად გამოკვლეული იყო 1905 წელს ფილდას მიერ (A. B. Field). უფრო სრულად „დენის გამოდევნის“ თეორია ელექტრული მანქანების გრაგნილებში დამუშავებული იყო ფ. ემდეს მიერ (F. Emde) ცოტა მოგვიანებით 1908 წ.

ფ. ემდეს გამოკვლევების თანახმად ღია ან ნახევრად დახურულ ღრმულებში განლაგებულ სწორკუთხა კვეთის გამტარების p რიგის ფენისათვის (ნახ. 348).

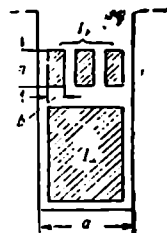
k კოეფიციენტის სიდიდე ტოლია:

$$k_p = \varphi(\xi) = \frac{I_u^2 + I_p I_u^2 \cos \gamma}{I_p^3} \varphi(\xi) \quad (25,3)$$

აქ განხილული გამტარების p რიგის ფენის სრული დენის ძალაა, ხოლო I_u — სრული დენია ამ ფენის ქვეშ ღრმულის ფუძემდებ, γ — ფაზების ძვრის კუთხეა I_p და I_u -ს შორის, $\varphi(\xi)$ და $\psi(\xi)$ ფუნქციებს შემდეგი სახე აქვთ (ნახ. 349).

$$\varphi(\xi) = \xi \cdot \frac{\text{sh } 2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch } 2\xi - \cos 2\xi}; \quad (25,4)$$

$$\psi(\xi) = 2\xi \cdot \frac{\text{sh } \xi - \sin \xi}{\text{ch } \xi + \cos \xi} \quad (25,5)$$



ნახ. 348. p რიგის ფენის გამტარები ღრმულებში.

ამ გამოსახულებებში სიდიდე ξ , რომელსაც განზომილება არა აქვს, წარმოადგენს გამტარის ე. წ. დაყვანილ სიმაღლეს:

$$\xi = a \cdot h, \quad (25,6)$$

ამასთან

$$a = \sqrt{\frac{\pi b \mu_0 \pi f}{a \rho}}, \quad (25,7)$$

სადაც h —გამტარების სიმაღლეა, b —მათი სიგანე, π —გვერდით მდებარე გამტარების რიცხვია პორიზონტალურ ფენაში, f —სიხშირე, ρ —სპილენძის ხვედრითი წინააღმდეგობაა, a —ღრმულის სიგანე.

უმრავლეს შემთხვევაში გრაგნილის ერთ ღრმულში მოთავსებულ გამტარებში ერთი და იგივე ღენი გადის, ამიტომ

$$\frac{I_n}{I_p} = p - 1.$$

მაშინ p რიგის ფენისათვის (25,3) თანახმად მივიღებთ:

$$k_p = \varphi(\xi) + p(p-1)\psi(\xi). \quad (25,8)$$

ღრმულში ყველა m ფენისათვის k კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა ტოლი იქნება:

$$k_n = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{3} \psi(\xi), \quad (25,9)$$

ვინაიდან

$$\frac{1}{m} \sum_1^m p(p-1) = \frac{m^2 - 1}{3}.$$

როდესაც $f = 50$ Hz-ს და $\theta = 75^\circ$ (25,7)-ის თანახმად $a \approx 1$, ამიტომ $\xi \approx h$ (აქ h გამოსახულია cm-ში).

პრაქტიკული გამოთვლებისათვის, როდესაც $0 \leq \xi \leq 1$ (25,4) და (25,5)-ის ნაცვლად შეიძლება გამოყენებული იქნეს განტოლებები:

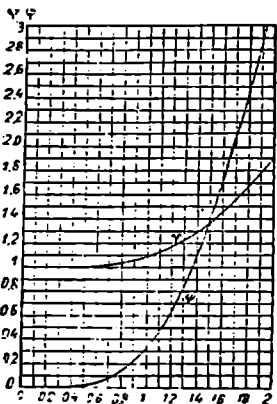
$$\varphi(\xi) \approx 1 + \frac{4}{45} \xi^4; \quad (25,10)$$

$$\psi(\xi) \approx \frac{1}{3} \xi^4; \quad (25,11)$$

თუ $\xi > 2$, $\varphi(\xi) \approx \xi$ და $\psi(\xi) \approx 2\xi$.

(25,10) და (25,11) გამოსახულებების შეტანით (25,9)-ში, გვექნება:

$$k_n \approx 1 + \frac{m^2 - 0,2}{9} \xi^4. \quad (25,12)$$



ნახ. 349. ემდეს ფუნქციები ფილდას კოეფიციენტისათვის.

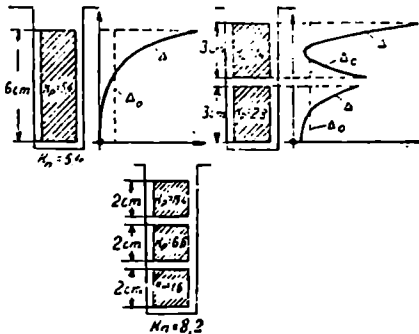
როდესაც გრაგნილი შედგება მრგვალი კვეთის გამტარისაგან, დანაკარგები გრიგლურ დენებზე მცირდება 0,59-მდე, იმასთან შედარებით, რაც ოთხკუთხა კვეთის შემთხვევაში გვაქვს. ამიტომ მრგვალი კვეთის გამტარებისათვის:

$$k_n \approx 1 + \frac{m^2 - 0,2}{15,25} \zeta^4. \quad (25,13)$$

ამისთანავე ζ განსაზღვრისათვის (25,6) და (25,7) განტოლების თანამდ, საჭიროა მივიღოთ, რომ $b=h=d$, სადაც d მრგვალი გამტარის დიამეტრია.

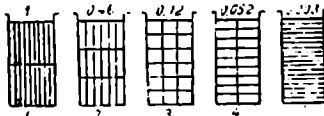
ნახ. 350-ზე მოცემულია k_p მნიშვნელობები გრაგნილების შექმნის სხვადასხვა შემთხვევისათვის, აგრეთვე ნაჩვენებია დენის სიმკვრივის განაწილების მრუდები ცვლადი (Δ) და შუღნივი (Δ_0) დენის შემთხვევისათვის¹. იქვე ნაჩვენებია k_n საშუალო მნიშვნელობები.

როგორც ნახ. 350-დან ჩანს, k_n უდიდესი საშუალო მნიშვნელობა გვაქვს ორთენა გრაგნილისათვის ($k_n = 8,4$). სამუგნა გრაგნილისათვის საშუალო მნიშვნელობა ნაკლებია ($k_n = 8,2$), მხოლოდ იმავე დროს ზედა ფენისათვის $k_p = 16,4$.



ნახ. 350. დენის ვაძოფვის ეფექტი ღრმულში გამტარების სხვადასხვა წესით განაწილების დროს.

დანაკარგები გრიგლურ დენებზე შეიძლება საგრძნობლად იქნეს შემცირებული გრაგნილის სწორი კონსტრუქციული შესრულების შემთხვევაში. არსებითი მნიშვნელობა აქვს გამტარების ფორმასა და მათ განლაგებას ღრმულში. ნახ. 351-ზე ნაჩვენებია თერამეტი გამტარის ღრმულში განაწილების ხუთი სხვადასხვა შემთხვევა. დანაკარგები გრიგლურ დენებზე, რომლებიც $k_n - 1$ -ით ხასითდება, I შემთხვევაში მიღებულია ერთეულად.



ნახ. 351. გამტარების ღრმულში სხვადასხვა წესით განლაგების გავლენა დამატებით დანაკარგებზე (I შემთხვევაში დანაკარგები მიჩნეულია ერთი ტოლად).

ნახ. 351-დან ჩანს, რომ დანაკარგები გრიგლურ დენებზე შესაძლებელია საგრძნობლად შევამციროთ გამტარის სიმაღლის შემცირებით.

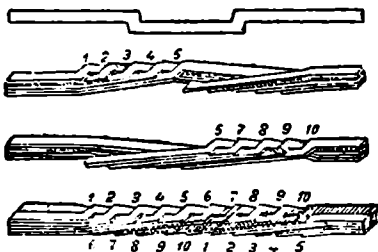
თანამედროვე მძლავრ ელექტრულ მანქანებში ოთხკუთხა გამტარებს ხშირად ყოფენ მცირე კვეთის ერთიმეორისაგან იზოლირებულ რამდენიმე პარალელურ გამტარებად, ისე, რომ მათი დახვევის

¹ ვინაიდან ცვლადი დენის სიმკვრივე კვეთის ცალკეულ ბოკელებში ფაზით სხვადასხვაა, ამიტომ $\int_S \Delta_0 ds \neq \int_S \Delta ds$, თუ \int_S აღებულია გამტარის მთლიან კვეთისათვის.

დროს ცალკეული გამტარები განლაგებულია ღრმულის მაგნიტური არეს სხვადასხვა ადგილებში (ტრანსპოზიცია ნახ. 352 და 328).

ზოგჯერ გამტარების ტრანსპოზიციას ახორციელებენ გრაგნილის შუბლურ ნაწილში (ნახ. 355).

ტრანსპოზიციის შედეგად სხვადასხვა პარალელური გამტარების ინდუქტიური წინააღმდეგობები თანაბრდება, და დანაკარგები გრიგლურ დენებისაგან დიდად მცირდება, ისე რომ დაახლოებით შეიძლება ჩავთვალოთ



ნახ. 352. გამტარების ტრანსპოზიციის შესრულება.

$$k_n = \varphi(\xi). \quad (25,14)$$

გრაგნილის შუბლურ ნაწილებში ფილდას კოეფიციენტი ახლოა ერთთან, ამიტომ მთლიანად გრაგნილისათვის საერთო კოეფიციენტი k ტოლია:

$$k = \frac{k_n l_i + l_a}{l_i + l_a} = \frac{k_n + \lambda}{1 + \lambda}, \quad (25,15)$$

სადაც l_a — გრაგნილის შუბლური

ნაწილის სიგრძეა, l_i — ლუხის საანგარიშო სიგრძე, ხოლო $\lambda = \frac{l_a}{l_i}$

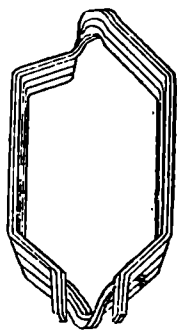
თანამედროვე მანქანებში ჩვეულებრივად $k \approx 1,1 \div 1,5$.

ბ) დანაკარგები ფოლადში. დანაკარგები ფოლადში ჰისტერეზისა და გრიგლურ დენებზე განისაზღვრება ჩვეულებრივად ცდის მონაცემების საფუძველზე, რომლებიც ეხასიათებს გამოყენებული ფოლადის თვისებებს.

იმ შემთხვევაში, როდესაც არ მოითხოვება ჰისტერეზისა და გრიგლურ დენებზე დანაკარგების ცალკეული განსაზღვრა, სარგებლობენ საანგარიშო ფორმულით:

$$P_c = \sum \sigma_c k_c G \left(\frac{B}{10^4}\right)^n \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} W/kC. \quad (25,16)$$

სადაც B სინუსოიდურად ცვლადი ინდუქციის ამპლიტუდური მნიშვნელობაა ჰაუსებში. მაგნიტური სისტემის მოცემულ ნაწილში, G ამ ნაწილის ფოლადის წონაა kg -ში, σ_c — ხვედრითი დანაკარგები ფოლადში (დანაკარგები $1 kg$ ფოლადში, როდესაც $B = 10000 Gs$ და სიხშირე $f = 50 Hz$), k_c — კოეფიციენტი მხედველობაში იღებს გადახრას ითვლილ და ნამდვილ დანაკარგებს შორის, რომელსაც შეიძლება ადგილი ჰქონდეს: ფოლადის ფურცლების ჰრისა და დატვიფრვის შედეგად დანაკარგების გაზრდით, ინდუქციის არასინუსოიდური წესით ცვლილებით, ან მაგნიტური არეს არაერთგვაროვანი განაწილების გამო.



ნახ. 353. გამტარების ტრანსპოზიცია ორფენა გრაგნილის შუბლურ ნაწილებში.

ხარისხის მაჩვენებელი n შეიძლება აღებული იქნას მე-20 ცხრილიდან. ხშირად ანგარიშის გამარტივების მიზნით ღებულობენ $n=2$.

ცხრილი 20

ფოლადის მარკა	დანაკარგები W/kg -ში თუ ფურცლის სისქე 0,5mm			დანაკარგები W/kg , თუ ფურცლის სისქე 0,35 mm		
	$B=10\ 000$	$B=15\ 000$	n	$B=10\ 000$	$B=15\ 000$	n
EC1	3,6	8,6	2,15	—	—	—
EC1A	3,3	7,9	2,16	—	—	—
EC1AA	2,85	7,0	2,22	—	—	—
EC2A	2,6	6,4	2,23	—	—	—
EC3A	2,3	5,6	2,20	2,0	4,2	1,84
EC4A	1,8	3,9	1,92	1,45	3,4	2,11
	1,8	3,8	1,78	1,3	3,3	2,30
EC4AA	1,6	3,5	1,93	—	—	—

იმ შემთხვევაში, როდესაც საჭიროა დანაკარგების ცალკეული განსაზღვრა ჰისტერეზისზე P_f და გრიგლურ დენებზე P_p აუცილებელია გრიგლურ დენებზე და ჰისტერეზისზე ხვედრითი დანაკარგების ცდით მიღებული ფარდობის ცოდნა, როდესაც $f=50\ Hz$. სხვა სიხშირის დროს

$$\frac{P_{pf}}{P_c} = \beta \frac{f}{50} \quad (25,17)$$

თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ $P_c = P_{pf} = P_e$, მივიღებთ:

$$P_{pf} = P_c \frac{\beta f}{\beta f + 50}; \quad (25,18)$$

$$P_e = P_c \frac{50}{\beta f + 50} \quad (25,19)$$

საშუალოდ 0,5 mm სისქის ფოლადის ფურცლებისათვის, თუ კაეზადის შემადგენლობა დაახლოებით 1% უდრის, $\beta=0,4$, როდესაც კაეზადის შემადგენლობა 4%-ია, $\beta=0,15$.

ფოლადში დანაკარგების გამოთვლის შემთხვევაში მაგნიტურ სისტემას ყოფენ ცალკე ნაწილებად, რომლის ფარგლებშიაც მაგნიტურ არეს თვლიან თანაბრად განაწილებულს. ცალკეულ ნაწილებში დანაკარგების გამოთვლა წარმოებს (25,16) ფორმულით და, შემდეგ ახდენენ მათ შეჯამებას.

კბილებში დანაკარგების ანგარიშს ახდენენ ინდუქციის მიხედვით მათ საშუალო კვეთში.

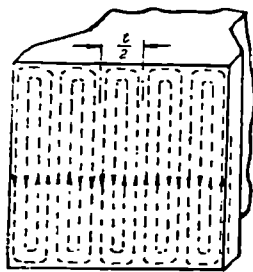
k_c კოეფიციენტის მნიშვნელობა სტატორისა და როტორის უღლებში დანაკარგების განსაზღვრისათვის შესაძლებელია ავიღოთ $k_c \approx 1,5 \div 2$ კბილებისათვის $k_c \approx 1,2 \div 1,4$.

ფოლადში (25,16)-ით გამოთვლილი დანაკარგების გარდა ადგილი აქვს ელექტრულ მანქანებში საპაერო ღრეჩოს კბილოვანი ფორმით გაპირობებულ

დამატებით დანაკარგებს გრიგლურ დენებზე. ცხადპოლუსა მანქანებში ეს დანაკარგები უმთავრესად შეყურსულია პოლუსის ქუსლებში და მათ ზედაპირულ დანაკარგებს უწოდებენ. სტატორისა და როტორზე კბილების არსებობის გამო, მაგალითად, ასინქრონულ მანქანებში, გარდა ზედაპირული დანაკარგებისა, ადვილი აქვთ აგრეთვე პულსაციური დანაკარგებს, ვინაიდან საპაერო ღრეჩოში, როტორისა და სტატორის კბილების ურთიერთ გადანაცვლების შედეგად მაგნიტური ნაკადი პერიოდულად ირყევა. პულსაციური დანაკარგები შეყურსულია უმთავრესად მანქანის კბილებში.

დასაწყისში განვიხილოთ ზედაპირული დანაკარგების ანგარიში.

როდესაც ცხადპოლუსა მანქანის როტორი ბრუნავს, კბილები გადის პოლუსის ქუსლის ახლოს და იწვევს უკანასკნელში ინდუქციის რყევას, რაც თავის მხრივ პოლუსის ქუსლში აინდუქტირებს გრიგლურ დენებს. მათი მიმართულება ნაჩვენებია ნახ. 354-ზე. პოლუსის ქუსლის ზედაპირზე ინდუქციის ცვლილების სიხშირე



ნახ. 354. ზედაპირული გრიგლური დენები.

$$f_s = \frac{Zn}{60}, \text{ სადაც } Z - \text{ღრმულთა}$$

რიცხვია საპაერო ღრეჩოს მთელი გარშემოწერილობის გასწვრივ. ჩვეულებრივად ეს სიხშირე საკმარისად მაღალია და აღწევს 1000 Hz-ს. ასეთი სიხშირის დროს გრიგლური დენები ვერ აღწევს პოლუსის ქუსლის სიღრმეს და შეყურსულია უმთავრესად საპაერო ღრეჩოსაკენ მიმართულ ზედაპირზე. ამიტომ მათ ზიერ გამოწვეულ დანაკარგებს ზედაპირულ დანაკარგებს უწოდებენ.

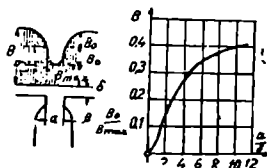
რ. რიუნდენბერგისა და რ. პიკის (R. V. Picou) გამოკვლევების თანახმად ზედაპირული დანაკარგები შესაძლებელია გამოთვლილი იქნეს ფორმულით:

$$P_{\text{ნოს}} = 2p S_H n k_0 k_1 \left(\frac{Z_2 n}{10000} \right)^{1,3} \cdot \left(\frac{B_0 t}{1000} \right)^2 10^{-4} \text{ W}, \quad (25,20)$$

სადაც S_H პოლუსის ქუსლის ფართობი cm^2 -ში;

$$B_0 = \frac{B_{\text{max}} - B_{\text{min}}}{2}. \quad (\text{ნახ. 355}) - \text{ინდუქციის}$$

რყევის ამპლიტუდაა ჰაუსებში პოლუსის ქუსლის ზედაპირზე მინიმალური საპაერო ღრეჩოს უბანში. t —საკბილო დანაყოფია cm -ში.



ნახ. 355. კბილოვანი ღრეჩოს საპაერო ღრეჩოში ინდუქციის ცვლილება;

k_0 კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია როგორც პოლუსის ქუსლის მაგნიტურ განვლადობაზე, ისე მის ხედრით წინააღმდეგობაზე და მოცემულია 21-ე ცხრილში:

პოლუსის ქუსლის კონსტრუქცია	k_2
პოლუსის ქუსლები მასიური რკინისაგან .	23,3
თუჯის პოლუსის ქუსლები	17,5
პოლუსის ქუსლები 1 მმ-იანი ფოლადის ფურცლებით	2,0
პოლუსის ქუსლები 1 მმ-იანი დინამიკური ფოლადის ფურცლებისაგან	14,6
პოლუსის ქუსლები 0.35 მმ დინამიკური ფურცლებისაგან .	2,5

k_1 კოეფიციენტი ითვალისწინებს საპაერო ღრეჩოში ინდუქციის განაწილებას. ცხადპოლუსა სინქრონულ მანქანებში, რომლის საპაერო ღრეჩოში, სადაც მაგნიტური არეს განაწილება სინუსოიდას უახლოვდება, $k_1 \approx 0,5$; არეს ტრაპეციოიდურ შემთხვევაში $k_1 \approx 1$.

ზედაპირულ დანაკარგებს ადგილი აქვს აგრეთვე მაშინაც, როდესაც სტატორი და როტორი შეიცავს ღრმულებს.

ასეთ დროს სტატორის ზედაპირული დანაკარგების ათვლა უნდა მოვახდინოთ როტორზე კბილების არსებობის გამო და პირიქით. სტატორში ზედაპირული დანაკარგების საანგარიშო ფორმულას აქვს სახე:

$$P_{r, nos} = 2p S_{\Sigma} k_0 k_1 \left(\frac{Z_r n}{10\,000} \right)^{1.5} \left(\frac{B_2 k_z \beta_r}{1\,000} \right)^2 10^{-4} W, \quad (25,21)$$

სადაც ინდუქსია s ეკუთვნის სტატორს, ხოლო r — როტორს, $2PS_{\Sigma} = \pi D l \frac{a_2 - a_1}{l_2} \text{cm}^2$, D საპაერო ღრეჩოს დიამეტრია, B_2 — ინდუქციის მაქსიმალური

მნიშვნელობა საპაერო ღრეჩოში, k_z — კარტერის კოეფიციენტი, $k_1 \approx 0,5$.

$P_{r, nos}$ -ზე ზედაპირული დანაკარგების S ანგარიშისათვის ვარგისია იგივე (25,21) ფორმულა, თუ მასში r ინდუქსიებს შევცვლით s -ით და პირიქით.

ზედაპირული დანაკარგები გამოწვეულია არა მარტო საპაერო ღრეჩოს მაგნიტური გამტარობის ცვლილებით, არამედ იმ გარემოებითაც, რომ ღრმულებში მოთავსებული გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალის მრუდი კბილური ფორმისაა. ამ დანაკარგებს ჩვეულებრივად გამოუთვლელი დამატებითი დანაკარგების კატეგორიას აკუთვნებენ.

როტორისა და სტატორის ღრმულოვანი შესრულების დროს მანქანის კბილებში გარდა ამისა იდგილი აქვს ინდუქციის სიდიდის რყევას სტატორისა და როტორის კბილების ურთიერთ განლაგების შესაბამისად — რყევის სიხშირე ისეთივეა, როგორც ზედაპირული დანაკარგების დროს. ამ რყევების შედეგად გრიგლური დენებისაგან წარმოიშევა პულსაციური დანაკარგები სტატორისა და როტორის კბილებში. ეს დანაკარგები შეიძლება გამოთვლილ იქნას მიხედვით რიხტერის შიერ წამოყენებული განტოლებით:

$$P_{r, pul} \approx 0,14 \left[\frac{Z_r n}{10\,000} \cdot \frac{B_{ps}}{1\,000} \right]^2 G_{rr} W, \quad (25,22)$$

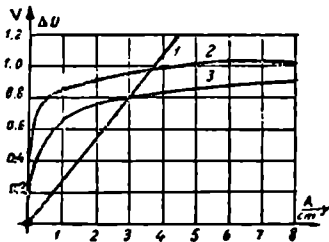
სადაც კბილებას საშუალო კვეთში ინდექსის პულსაციის ამპლიტუდა

$$B_{pr} \approx \frac{\gamma_r \delta}{2t_s} B_{st, cp} \quad (25,23)$$

კოეფიციენტი γ_r განისაზღვრება $\gamma_r = \frac{\left(\frac{a}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a}{\gamma}}$, სადაც a ღრმულის სიგანეა,

t_s —სტატორის საკბილო დანაყოფი $B_{st, cp}$ —სტატორის კბილის საშუალო კვეთში ინდექსის მნიშვნელობა, G_{st} —სტატორის კბილების წონაა kG -ში. პულსაციური დანაკარგების განსაზღვრა როტორში ხდება იგივე (25,22) და (25,23) ფორმულების თანახმად, თუ ინდექსს s შევცვლით r -ით და პირიქით.

გ) დანაკარგები მუსების კონტაქტში. მუსების კონტაქტში ეს დანაკარგები ორგვარი სახისაა: 1. ჯოჯის სითბოზე და 2. მექანიკური (ხახუნისაგან). ჯოჯის დანაკარგები განისაზღვრება ძაბვის ვარდნით მუსების კონტაქტში.



$$P_{\mu\sigma} = \Delta U \cdot I \quad (25,24)$$

სადაც ΔU —ძაბვის ვარდნაა, რომელიც დამოკიდებულია მუსების მასალაზე და დენის მიმართულებაზე. ΔU_s -ს სიდიდე იცვლება (0,5÷1,5) V. საშუალოდ დებულობენ, რომ $\Delta U \approx 1$ V.

ნახ. 356. მუსის კონტაქტის მახასიათებლები. 1. უძრავი კონტაქტი. 2. მუსა მოძრავ კოლექტორზე ა5 რგოლზე, როდესაც დენის მიმართულებაა ლითონი—მუსა; 3. იგივე დენის შებრუნებული მიმართულებისათვის.

როგორც ნახ. 356-დან ჩანს, დენის მცირე სიმკვრივის შემთხვევაში ΔU მკვეთრად იზრდება და, შემდეგ

თითქმის უცვლელი რჩება. ასეთ დამოკიდებულებას ადგილი აქვს როგორც ცვლადი ისე მუდმივი დენის დროს.

მუსების კოლექტორთან ან საკონტაქტო რგოლებთან დანაკარგები ხახუნზე შესაძლებელია გამოავლილ იქნას განტოლებათ:

$$p_{\mu\sigma} = 9,81 \mu_{\mu} \cdot P_{\mu\sigma} \cdot F_{\mu\sigma} \cdot v \quad W \quad (25,25)$$

აქ $F_{\mu\sigma}$ შეხების საერთო ფართობია cm^2 -ში, v მუსის წრიული სიჩქარე m/sec , $P_{\mu\sigma}$ —მუსის დაწოლა, რომელიც ჩვეულებრივად ტოლია $\sigma, 2 \div 0.25$ kC/cm^2 , μ_{μ} —ხახუნის კოეფიციენტი, საკონტაქტო რგოლებისათვის $\mu_{\mu} = 0,15 \div 0,2$ კოლექტორებისათვის $\mu_{\mu} = 0,25 \div 0,3$.

დ) მექანიკური დანაკარგები. მცირე და საშუალო სიმძლავრის მანქანებში დანაკარგების გამოთვლა საკისრებში ხახუნზე შესაძლებელია ქვემოთ მოყვანილი ემპირიული ფორმულებით:

1. ს რ ი ა ლ ის ს ა კ ის რ ე ბ ის ა თ ვ ის

$$P_n \approx k_m \cdot d \cdot l \cdot v^{1,5} \quad W \quad (25,26)$$

სადაც d და l ლილვის საყელურის ზომებია cm -ში. v მისი წრიული სიჩქარეა m/sec -ში და კოეფიციენტი k_m —დამოკიდებულია ერთმანეთთან შეხებაში მყოფი მოძრავი ნაწილების ზედაპირების დამუშავებაზე, საშუალოდ $k_m \approx 0,3 \div 0,5$.

2. ბურთულა საკიბარებისათვის

$$P_n \approx 0,015 \frac{G}{D} \cdot v \quad W, \quad (25,27)$$

სადაც G — რგოლზე დატვირთვაა kG -ში, D ბურთულების ცენტრების დიამეტრია cm -ში, ხოლო v — ლილვის საყელურის წრიული სიჩქარეა m/sec -ში.

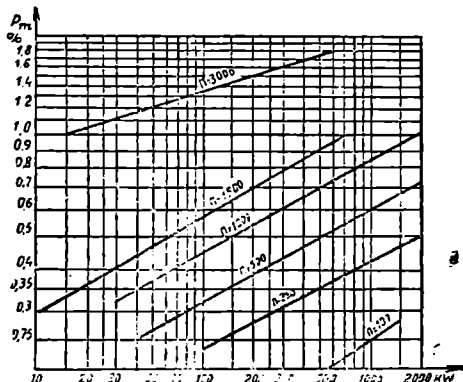
საენტილაციო დანაკარგების გამოთვლა თვითმავენტისებელ მანქანებში მიახლოებით შესაძლებელია შემდეგი განტოლებების თანახმად:

$$P_n \approx v^2 \Sigma P \quad W \quad (25,28)$$

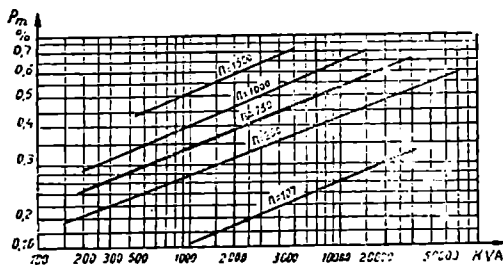
Δპ

სადაც ΣP გამაცივებელი ჰაერით გარემოს გადაცემული დანაკარგებია kW -ში. v — როტორის ზედაპირზე წრიული სიჩქარეა m/sec -ში. Δp — მანქანაში შემავალი და გამომავალი ჰაერის ტემპერატურათა სხვაობა, $^{\circ}C$; ჩვეულებრივად Δp იცვლება 10—25 $^{\circ}C$ ფარგლებში.

იმის გამო, რომ მართივი საანგარიშო (25,26) — (25,28) ფორმულებით ძნელია უვლა იმ ფაქტორების მხედველობაში მიიღება, რომლებიც გავლენას ახდენს მექანიკური დანაკარგების სიდიდეზე. ამ დანაკარგების განსაზღვრას აწარმოებენ ცდების საშუალებით უკვე დამზადებულ მანქანაში. ნახ. 357, 358, ა და 358 ბ-ზე მოყვანილია ცდის შედეგები, რომლებიც საშუალებას გვაძლევს სხვადასხვა ტიპის მანქანებში განვსაზღვროთ ჯამური მექანიკური დანაკარგები



ნახ. 357. ასინქრონული მანქანების მექანიკური დანაკარგები.



ნახ. 358, ა. ცხადობულსა სინქრონული მანქანის მექანიკური დანაკარგები.

$P_m = P_n + P_b$, ეს დანაკარგები ნაჩვენებია ნორმალური სიმძლავრის პროცენტებში.

ვ) ელექტრული მანქანის მ. ქ. კ. ელექტრული მანქანის მ. ქ. კ. გენერატორული და ძრავული რეჟიმებისათვის შეიძლება გამოსახულ იქნეს შემდეგნაირად:

გენერატორული რეჟიმისათვის:

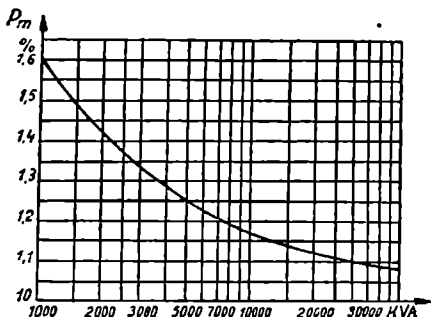
$$\eta_g = \frac{mUI_a}{mUI_a + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{mUI_a + \Sigma P}; \quad (35,29)$$

ძრავული რეჟიმისათვის:

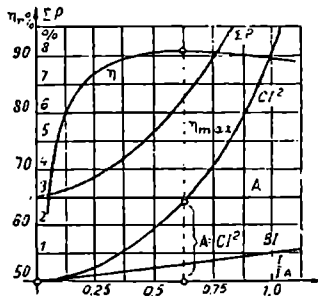
$$\eta_d = \frac{mUI_a - \Sigma P}{mUI_a} = 1 - \frac{\Sigma P}{mUI_a}; \quad (25,30)$$

სადაც m —ფაზათა რიცხვია, U —ფაზური ძაბვა, I_a —ფაზური დენის აქტიური მდგენელი, ხოლო ΣP —ყველა დანაკარგების ჯამია მანქანაში.

როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები, დატვირთვის დენის ცვლილების დროს



ნახ. 358. ბ. არაცხადლოუსი სინქრონული მანქანის მექანიკური დანაკარგები ($n=3000$ ბრ (წთ))



ნახ. 359. დანაკარგებისა და მ. ქ. კ მუდღებში.

ზოგიერთი დანაკარგები თითქმის უცვლელი რჩება, ზოგი მათგანი იცვლება დენის პირველი ხარისხის პროპორციულად და, ბოლოს მესამეჯგუფი იცვლება დატვირთვის კვადრატის პროპორციულად.

პირველ ჯგუფს ეკუთვნის ყველა მექანიკური დანაკარგები (როდესაც $n = \text{const}$), დიდი ნაწილი ფოლადში დანაკარგებისა და დანაკარგები ისეთი ალგზნების გრაგნილებში, სადაც დენის ძალა არ იცვლება დატვირთვის ცვლასთან ერთად.

მეორე ჯგუფს ეკუთვნის დანაკარგები ჯოჯის სითბოზე მუსების კონტაქტში.

დანაკარგების მესამე ჯგუფს შეადგენს დანაკარგები გრაგნილებში, სადაც დატვირთვის დენი მოკმედებს, და დამატებითი დანაკარგების დიდი ნაწილი.

ამგვარად შესაძლებელია დავწეროთ

$$\Sigma P = A + BI + CI^2. \quad (25,31)$$

განვიხილოთ დენის რა მნიშვნელობისათვის ექნება მ. ქ. კ. მაქსიმალური მნიშვნელობა. როგორც (25,29) და (25,30)-დან ჩანს, მ. ქ. კ. იქნება მაქსიმალური, როდესაც ფარდობა $\frac{\Sigma P}{mUI_0}$ მინიმალურია. თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ $I_0 = I \cdot \cos \varphi$ და ჩავთვლით $\cos \varphi = \text{const}$, მივიღებთ პირობას μ_{min} -სათვის:

$$\frac{d}{dI} \left(\frac{\Sigma P}{I} \right) = -\frac{A}{I^2} + C = 0, \quad (25,32)$$

საიდანაც

$$I = CI^2.$$

ამგვარად, მაქსიმალური მ. ქ. კ. გვაქვს ისეთი დენის დროს, როდესაც მანქანის მუდმივი დანაკარგები ტოლია დენის კვადრატის პროპორციული ცვლადი დანაკარგების, ნახ. 359-ზე ნაჩვენებია მ. ქ. კ. და დანაკარგების დატვირთვისაგან დამოკიდებულების მრუდები. მრუდების ფორმა შეესაბამება ზემოთ მიღებულ კანონს. დანაკარგები ΣP გამოსახულია ნომინალური სიმძლავრის პროცენტებში.

IV. ასინქრონული მანქანები

უკოლექტორო—ასინქრონულ მანქანების შესახებ ნაწ. I, §4-ში მოცემული წინასწარი ცნობების და ცვლადი დენის მანქანების თეორიის ნაწ. III-ში გადმოცემულ საერთო საკითხების საფუძველზე წიგნის წინამდებარე IV ნაწილში განხილული იქნება უფრო დაწვრილებით ასინქრონულ უკოლექტორო მანქანების მუშა პროცესის თეორია და მოცემული იქნება ძირითადი ცნობები მათი თანამედროვე კონსტრუქციული შესრულების შესახებ.

ყველა საკითხები, რომლებიც ეხება ასინქრონული მანქანების გამოყენებას აგრეგატებში სხვა ელექტრულ მანქანებთან ერთად (კასკადური და სხვა სქემები) და, აგრეთვე კოლექტორული ასინქრონული მანქანების თეორია, განხილული იქნება ცალკე.

ასინქრონული მანქანა პრაქტიკაში უმთავრესად გამოიყენება როგორც მბრუნავი მანქანა. მაგრამ იგი შეიძლება გამოყენებული იქნეს აგრეთვე დამუხრუჭებულ მდგომარეობაშიც, როგორც მოსაბრუნებელი ტრანსფორმატორი, რეაქტიული კოქა და ძაბვის რეგულატორი.

მბრუნავი ასინქრონული მანქანის თეორიის უკეთ შეთვისებისათვის მისი გამოყენება დამუხრუჭებულ მდგომარეობაში განხილული იქნება დასაწყისში, ასინქრონულ მანქანებში ხმარებული გრაგნილების მოკლე დახასიათების შემდეგ.

ასინქრონული მანქანის ნორმალურ სიდიდეებს, რომლებიც ნაჩვენებია მის დაფაზე, წარმოადგენს:

1. სიმძლავრე (სასარგებლო)— $K IV$ -ში;
2. სტატორის გრაგნილის ხაზური ძაბვა— V -ში;
3. ხაზური დენი— A -ში;
4. სიხშირე H ,—ში;
5. ბრუნვათა რიცხვი წამებში;
6. სიმძლავრის კოეფიციენტი (სტატორის ფაზურ ძაბვასა და დენს შორის ფაზათა ძვრის კუთხის კოსინუსი);
7. მარგი ქმედების კოეფიციენტი;
8. როტორის გრაგნილის ძაბვა და დენი (საკონტაქტო რგოლებზე).

გარდა ამისა დაფაზე ნაჩვენებია სტატორის გრაგნილების შეერთების სქემა და მანქანის სრული წონა $K G$ -ში, რომლის ცოდნაც მეტად მნიშვნელოვანია მანქანის მონტაჟის დროს.

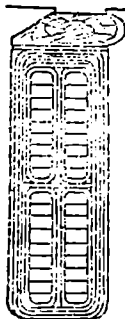
ა) სტატორის გრაგნილები. სტატორის გრაგნილებად შეიძლება გამოყენებული იქნეს ცვლადი დენის გრაგნილები, რომლებიც განხილული იყო ნაწ. III, § 23-ში. უკანასკნელ ხანებში სსრ კავშირის ქარხნებში ყველაზე მეტი გავრცელება აქვს შაბლონურ ორფენა (ამერიკულ) გრაგნილს შემოკლებული ბიჯით. მცირე სიმძლავრის ძრავებში ძაბვით 500 V-მდე ჩვეულებრივად გამოიყენება ნახევრად ღია ღრმულები (ნახ. 360)¹. ამ შემთხვევაში გრაგნილის წინასწარ დახვეული და განმბოლოებული ოთხი კოჭა ერთიმეორის მიყოლებით იწყობა ღრმულში. ამის შემდეგ ღრმულის ზედა ან ქვედა ნაწილში ერთმანეთის გვერდით ჩაწყობილი ერთი ფენის სექციები წავილ-წყვილად ერთდება მიმდევრობით ან პარალელურად, ისე, რომ შეადგენს გრაგნილის სტეპის ერთ ელემენტს.

ღიდი სიმძლავრის მანქანებში, როდესაც მუშა ძაბვა აღემატება 500 V, უფრო ხშირი გამოყენება აქვს ღია ღრმულებს (ნახ. 361), ამასთან ყოველ ღრმულში ჩალაგებულია ორი კოჭა. გრაგნილის იზოლაცია A ან B კლასისაა (ნაწ. I, § 6).

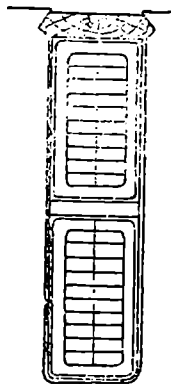
დაბალი ძაბვის (500 V-მდე) გრაგნილების გაელენთა ხდება მაღალხარისხოვანი ლაქით. თავდაპირველად, გაელენთავენ ცალკეულ კოჭებს ჩაწყობამდე, შემდეგ კი მთელ სტატორსაც ჩაწყობილი გრაგნილით. 2000 V და მეტი ძაბვის დროს ახდენენ ყველა გრაგნილების კოჭების კომპაუნდირებას ვაკუუმის ქვეშ. ეს უზრუნველყოფს იზოლაციის მაღალ ელექტრულ სიმტკიცეს, უკეთეს თბოგამტარობას და თბოგამქლეობას.

ღიდი სიმძლავრის მანქანების გრაგნილის შუბლური ნაწილების მექანიკური დამაგრება ხდება მრგვალი კვეთის რკინის სალტეებით და დისტანციური საფენებით კოჭებს შორის.

სტატორის გრაგნილის შეერთება ხდება ვარსკვლავად ან სამკუთხედად. გრაგნილის შეერთება Δ ან λ შეიძლება შესრულებული იქნეს მანქანის შიგნით. ამ შემთხვევაში სტატორზე მოთავსებულ გამომყვანების ყუთში გვაქვს აამი მომკერი და მანქანას შეუძლია იმუშაოს ნომინალური ძაბვის მხოლოდ ერთი მნიშვნელობის დროს. ზოგჯერ, როგორც ეს ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, მიზანშეწონილია გვექონდეს სტატორის გრაგნილის λ-დან Δ-ზე ან პირიქით



ნახ. 360.
სტატორის ნახევრად
ღია ღრმული.

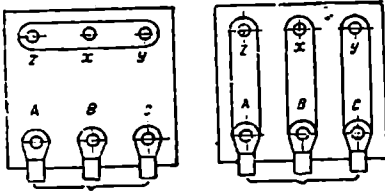


ნახ. 361.
სტატორის ღია
ღრმული.

¹ ნახევრად დახურული ღრმულებისაგან განსხვავებით ნახევრად ღია ღრმულებს აქვს უფრო განიერი ღრმობა, რომელიც დაახლოებით ღრმულის სიგანის ნახევრის ტოლია.

გადართვის შესაძლებლობა. ამ შემთხვევაში გამოიყენება გამოყვანების ყუთები ექვსი მომკერით. საში ქვედა მომკერი განკუთვნილია ქსელთან მისაერთებლად (ნახ. 362).

შემაერთებელი თამასების საშუალებით, როგორც ნახ. 362-ზეა ნაჩვენები შესაძლებელია სტატორის გრაგნილების ჩართვა Δ-ად ან λ-ად.

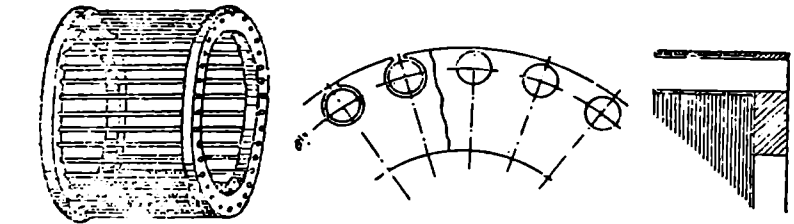


ნახ. 362.

თავსებულ საკონტაქტო რგოლებთან (ნახ. 29).

როტორის გრაგნილად მცირე სიმძლავრის მანქანებში ხმარობენ ჩვეულებრივად კოქისებურ გრაგნილს, ხოლო დიდი სიმძლავრეებისათვის ორფენა ლეროვან გრაგნილს დიამეტრალური ბიჯით.

ამგამად სულ უფრო მეტ გავრცელებას პოულობენ როტორები მოკლედ შეერთებული გრაგნილებით.



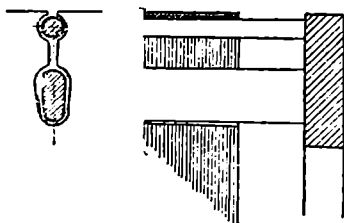
ნახ. 363. როტორის ციყვის ბორბალი.

როტორის ყველაზე უფრო მარტივ მოკლედ შეერთებულ გრაგნილს წარმოადგენს გრაგნილი ციყვის ბორბლის სახით (ნახ. 363), რომელიც პირველად მ. დოლიეო-დობროვოლსკიმ მოგვცა. მცირე სიმძლავრის მანქანებში ასეთი ციყვის ბორბალი განხორციელებულია როტორის ღრმულებში გამდნარი ალუმინის ჩასხმით. ამ შემთხვევაში ჩამკეტი რგოლები წარმოადგენს ერთ მთლიანს ლეროებთან ერთად.

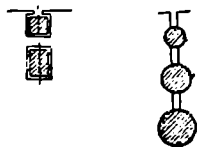
ციყვის ბორბლის სახით შესრულებულ როტორს აქვს მთელი რიგი უპირობესობა საკონტაქტო რგოლებთან როტორთან შედარებით: მოწყობილობის სიმარტივე, დიდი გამძლეობა ექსპლოატაციაში და ნაკლები ღირებულება. მაგრამ, როგორც ეს ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, მას აქვს შედარებით ცუდი გამწვი თვისებები.

ამ ნაკლის თავიდან ასაცილებლად ციყვის ბორბლიანი როტორის კონსტრუქცია რამდენადმე რთულდება.

მ. დოლივო-დობროვოლსკის, ხოლო შემდეგ მ. ბუშეროს (M. Bouscherot). წინადადებით როტორზე დაიწყეს განსხვავებული აქტიური და ინდუქტიური წინააღმდეგობების მქონე ორი ციყვის ბორბლის მოთავსება (ნახ. 364).



ნახ. 364. ორმაგი ციყვის ბორბალი.

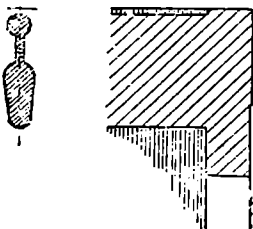


ნახ. 365. სამმაგი ციყვის ბორბალი.

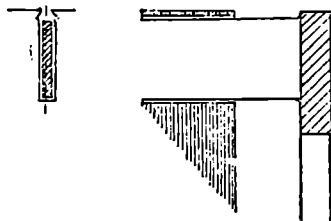
ძრავებს ასეთი როტორით ეწოდება ძრავები ორმაგი ციყვის ბორბლით, ან ბუშეროს ძრავები (იხ. ნაწ. IV, § 36).

ციყვის ბორბლები ტორსულ მხარეზე შეიძლება იყოს ჩაკეტილი საერთო რგოლით ან თითოეული ბორბალი ცალკე რგოლით.

ზოგჯერ როტორზე ორის ნაცვლად ითავსებენ სამ ციყვის ბორბალს (ნახ. 365).



ნახ. 366. ჩამოსხმული ორმაგი ციყვის ბორბალი.



ნახ. 367. ღრმა ღრმულებიანი როტორის ციყვის ბორბალი.

ზოგჯერ ორმაგი ციყვის ბორბლის ორივე ღეროს აერთიანებენ; ორი ბორბლის ნაცვლად მიიღება ფასონური კვეთის მქონე ღეროიანი ერთი ციყვის ბორბალი (ნახ. 366). ამჟამად ასეთი როტორები კეთდება ღრმულებში ალუმინის ჩასხმით.

ფასონური კვეთის ღეროების ნაცვლად შეიძლება ავიღოთ ღრმული და ღერო შედარებით დიდი სიმაღლით და მცირე სიგანით (ნახ. 367).

ნახ. 367-ის მიხედვით შესრულებულ როტორს ეწოდება როტორი ღია ღრმულით. ასეთი როტორი შემოთავაზებული იყო ერთიმეორისაგან დამოუკიდებლად კირშტედტისა (Kirstaedt) და პროფ. რიულენდბერგის მიერ (R. Rüdenberg).

უნდა აღვნიშნოთ, რომ მაგალითებით არ ამოიწურება ციყვის ბორბლიანი როტორის ყველა არსებული მოდიფიკაციები.

27. ასინქრონული ძრავი უძრავი როტორის შემთხვევაში ($S=1$)

ა) საერთო შენიშვნები. ასინქრონული მანქანა უძრავი როტორით შეიძლება გამოყენებული იქნეს იმ მიზნებისათვის, რომლებიც არაა დაკავშირებული ელექტროენერჯის მექანიკურ ენერჯიად გარდაქმნასთან და პირიქით. როდესაც როტორი უძრავია მისი კუთხური სიჩქარე $\omega_2=0$, ამიტომ სრიალი

$$(ნაწ. 1, § 4, ბ) S = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = 1.$$

თუ მანქანის პირველად წრედს ვკვებავთ ქსელიდან, მეორადი წრედი, ისე, როგორც ჩვეულებრივ ტრანსფორმატორში, შეიძლება გამოვიყენოთ ძაბვის აწვევისათვის ან დაწვევისათვის.

ჩავრთავთ რა ორივე გრაგნილს მიძღვერობით ან პარალელურად, ასინქრონული მანქანა შეიძლება გამოვიყენოთ როგორც მარეგულირებელი რეაქტიული კოქა.

და ბოლოს, ჩართვენ რა სტატორისა და როტორის გრაგნილებს ავტოტრანსფორმატორის სქემით, ასინქრონულ მანქანას, როდესაც $S=1$, გამოიყენებენ ძაბვის მდოგრე რეგულირების მიზნით. უკანასკნელ სქემას ინდუქციური რეგულატორის სქემა ეწოდება.

ყველა ამ შემთხვევაში როტორს კიაგადაცემის საშუალებით შეუძლია მობრუნება ლილვის ღერძის მიმართ ისე, რომ სტატორისა და როტორის გრაგნილების ღერძებს ერთიმეორის მიმართ შეუძლია დაიკავონ სხვადასხვა მდებარეობა.

როტორისა და სტატორის გრაგნილის ღერძების ეს ფარდობითი დაძვრა იწვევს გრაგნილებში მბრუნავი არეს მიერ აღძრული ე. მ. ძ.-ბის ფაზით დაძვრას.

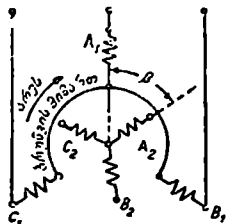
მართლაც, ვთქვათ ასინქრონული მანქანის სტატორის ვარსკვლავად შეერთებული გრაგნილი მიერთებულია ქსელთან. ჩავთვალოთ, რომ რგოლებიანი როტორის გრაგნილი ასევე ვარსკვლავადაა შეერთებული¹, ამასთან როტორის მდებარეობა ისეთია, რომ მისი ცალკეული ფაზების ღერძები β კუთხითაა დაძრული სტატორის შესაბამისი ფაზების ღერძების მიმართ, მაგალითად სტატორის მბრუნავი არეს ბრუნვის მიმართულებით. როტორის გრაგნილი გახსნილია (ნახ. 368).

¹ სტატორის და როტორის გრაგნილები ასევე შესაძლებელია შეერთებული იქნენ ერთი ვარსკვლავად, მეორე სამკუთხედად, ან ორივე სამკუთხური წესით.

მბრუნავი არეს მიერ როტორისა და სტატორის გრაგნილებში აღძრული ელექტრომაგნიტური ძალები ისე შეეფარდება ერთმანეთს როგორც

$$k_{12} = E_1 : E_2 = \omega_1 k_{1\omega} : \omega_2 k_{2\omega}$$

აქ ω_1 და ω_2 სტატორისა და როტორის ფაზების ხვევთა რიცხვია, $k_{1\omega}$ და $k_{2\omega}$ —სათანადო გრაგნილის კოეფიციენტებია. არეს ინდუქციური ხაზები თავისი ბრუნვის დროს გადაჰყვითს სტატორის გრაგნილის A_1 ფაზას, როტორის მობრუნების β კუთხის შესაბამისი β' დროითი კუთხით აღრე, ვიდრე



ნახ. 368.



ნახ. 369.



ნახ. 370.

როტორის გრაგნილის A_2 ფაზას. ე. მ. ძ.-ების ვექტორული დიაგრამა ამ შემთხვევისათვის მოცემულია ნახ. 369-ზე. თუ გამარტივების მიზნით უგულვებელვყოფთ სტატორის გრაგნილში ძაბვის ვარდნას, მაშინ, ცხადია $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$, სადაც \dot{U}_1 —სტატორის ფაზაზე მოდებული ძაბვაა.

ორპოლუსა მანქანისათვის $\beta' = \beta$.

როდესაც $2P > 2$, $\beta' = \beta/2$.

თუ როტორი მობრუნებულია არეს ბრუნვის მიმართულების საწინააღმდეგოდ, მაშინ ე. მ. ძ. $E_2 \beta'$ კუთხით იქნება წინ გასწორებული E_1 ე. მ. ძ.-ის მიმართ (ნახ. 370).

E_1 და E_2 ე. მ. ძ.-ების მნიშვნელობები ისევე, როგორც მათი ფარდობა $k_{12} = E_1 : E_2$, ამ დროს ცხადია არ იცვლება.

ბ) სამფაზა მოსაბრუნებელი ტრანსფორმატორი. ფაზათა რეგულატორი. მიუხედავად იმისა, რომ სტატორის გრაგნილს ქსელთან, როტორის გრაგნილთან კი დატვირთვის (ნახ. 371) ასინქრონული მანქანა (როდესაც $S=1$) შეგვიძლია გაზოვიყენოთ, როგორც ამწევი ან დამწევი სამფაზა ტრანსფორმატორი, რომელიც გვაძლევს შეერთების ჯგუფების მდოვრე ცვლილებების საშუალებას, მაგრამ ამ სქემას გამოყენება აქვს მხოლოდ ლაბორატორიულ პირობებში, ვინაიდან ასეთ ტრანსფორმატორს ჩვეულებრივთან შედარებით აქვს უფრო უქმი სვლის დიდი დენი, რომელიც აღწევს ნომინალური დენის $(50 \div 60)\%$ -ს და მოკლე შერთვის დიდი ძაბვა $u_2 = (15 \div 30)\%$.

უქმი სვლის დიდი დენი გამოწვეულია სტატორისა და როტორის შორის საპაერო ღრეჩოს არსებობით, რომელიც მაგნიტური ნაკადის შესაქმნელად მითხოვს საგრძნობ დამამაგნიტებელ ძალებს.

ϵ_2 -ს დიდი მნიშვნელობა აიხსნება სტატორისა და როტორის გრაგნილების ღრმულეებში განაწილებით, რის გამოც ასინქრონულ მანქანაში შეუძლებელია გვექნდეს ისეთი მცირე სიდიდის ფანტვის ნაკადები, როგორც ტრანსფორმატორებში.

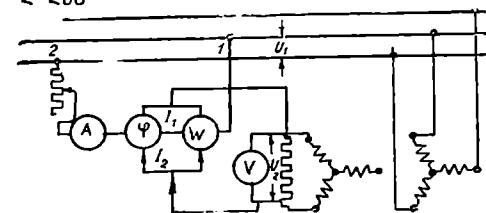
ასეთი ტრანსფორმატორის შეერთების ჯგუფები, ზემოთ ნათქვამის თანახმად, დამოკიდებულია როტორის მობრუნების β კუთხეზე და, მაშასადამე გვექნება მდოგურ ცვლილების საშუალება.

მნიშვნელოვანი გავრცელება აქვს ფაზორეგულატორის სქემას (ნახ. 372), რომელიც გამოიყენება მრიცხველების, ვატმეტრების, ფაზომეტრების და ა. შ. შემოწმების მიზნით. ფაზათა რეგულატორის როტორის გრაგნილს—მიუერთდება გამოსაცდელი ხელსაწყოთა დაბვის გრაგნილი.

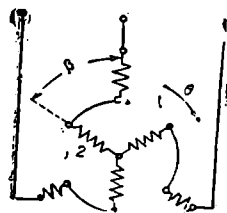
როტორის მობრუნებით U_2 დაბვას ფაზით დაძრავენ U_1 დაბვის მიმართ და მაშასადამე ხელსაწყოთა დაბვის გრაგნილში გამავალ I_2 დენსაც დენის გრაგნილში მოქმედ I_1 დენის მიმართ.

იმის მიხედვით მოაბრუნებენ როტორს არეს ბრუნვის მიმართულებით, თუ მის საწინააღმდეგოდ, I_2 დენი ფაზით წინ

უსწრებს ან ჩაშორდება I_1 დენს. ამგვარად მიიღება ისეთი ეფექტი, თითქოს ფაზომეტრი ჩართული იყოს წრედში ინდუქტიური ან ტევადური დატვირთვით, მაშინ, როდესაც 1—2 წრედს აქვს მხოლოდ წმინდა აქტიური წინააღმდეგობა.



ნახ. 372.



ნახ. 373.

გ) სამფაზა ასინქრონული მანქანა, როგორც მარეგულირებელი რეაქტიული კოჭა

ამ შემთხვევაში სტატორის და როტორის გრაგნილები ჩაირთვება მიმდევრობით ან პარალელურად. ამ ჩართვებს შორის არ არსებობს პრინციპული განსხვავება. სტატორისა და როტორის გრაგნილები ჩაირთვება ისეთნაირად, რომ Θ_1 და Θ_2 დამამაგნიტებელი ძალები ბრუნავდეს ერთი და იგივე მიმართულებით.

განვიხილოთ მიმდევრობითი ჩართვის შემთხვევა (ნახ. 373). დაუშვათ, რომ დაბვა მანქანის მოქმედებაზე, მაგნიტური ნაკადი და დენები სინუსოიდუ-

რია. რეზულტიური დამამაგნიტებელი ძალა Θ შეიქნება სტატორის და როტორის დამამაგნიტებელი ძალების ჯამით, ე. ი. $\Theta = \overline{\Theta_1 + \Theta_2}$ (ნახ. 374). ეს დამამაგნიტებელი ძალები სივრცეში ერთი შეორისაგან დამძრულია როტორის შობრუნების კუთხის შესაბამისი β კუთხით. დაეუშვათ, რომ როტორი შობრუნებულია არეს ბრუნვის მიმართულების საწინააღმდეგოდ. ნახ. 374-დან გვაქვს

$$\Theta = \sqrt{\Theta_1^2 + \Theta_2^2 + 2\Theta_1\Theta_2 \cos\beta}$$

ვინაიდან

$$\Theta_1 = k k_1 i \omega_1, \quad \Theta_2 = k k_2 i \omega_2,$$

სადაც k —პროპორციულობის კოეფიციენტი, გვაქვს

$$\Theta = k i \sqrt{k_1^2 \omega_1^2 + k_2^2 \omega_2^2 + 2\omega_1 \omega_2 k_1 k_2 \cos\beta} = k i \omega \quad (27,1)$$

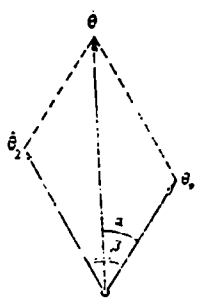
რეზულტიური მაგნიტური ნაკადი საჭაერო ღრეზოში $\Phi = k_3 \Theta$, ამასთან მაგნიტური წრედის პარამეტრებისაგან დამოკიდებული k_3 კოეფიციენტი გაუფლნთავ მანქანისათვის წარმოადგენს მუდმივ სიდიდეს, ამიტომ (27,1)-ის თანახმად $\Phi = k k_3 i \omega$. ამ ნაკადს შეესაბამება ნაკადშებმის რიცხვი $\psi = k_4 \Phi \omega$, ამასთან კოეფიციენტი k_4 დამოკიდებულია გრაგნილების განაწილებისაგან ღრუნებში.

მანქანის ინდუქტიობა $L\beta$ ტოლი იქნება:

$$L\beta = \frac{\psi}{I} = k k_3 k_4 \omega^2 = k \omega^2 \quad (27,2)$$

მიღებული გამოსახულებიდან გამომდინარეობს რომ (ნახ. 373)-ის სქემის მიხედვით ჩართული ასინქრონული მანქანა შეიძლება განვიხილოთ, როგორც რეაქტიული სამფაზა კოჭა ცვლადი ხვევთა რიცხვით:

ნახ. 374. მოსაბრუნებელი რეაქტიული დამამაგნიტებელი ძალის სივრცული დიაგრამა.



$$\omega \beta = \sqrt{k_1^2 \omega_1^2 + k_2^2 \omega_2^2 + 2\omega_1 \omega_2 k_1 k_2 \cos\beta}$$

$L\beta$ ინდუქტიობას შეესაბამება ინდუქტიური წინააღმდეგობა

$$\omega_1 L\beta = K(k_1 \omega_1 \omega_1^2 + k_2 \omega_1 \omega_2^2 + 2k_1 k_2 \omega_1 \omega_2 \cos\beta) = x_1 + x_2 + 2x_{12} \cos\beta. \quad (27,3)$$

სტატორისა და როტორის ფანტვის არეების არსებობის გამო რეაქტიული კოჭას სრული ინდუქტიური წინააღმდეგობა მეტი იქნება, და ტოლია:

$$x_3 = (x_1 + x_{s1}) + (x_2 + x_{s2}) + 2x_{12} \cos\beta.$$

x_{s1} და x_{s2} სტატორისა და როტორის გრაგნილების ფანტვის ინდუქტიური წინააღმდეგობებია.

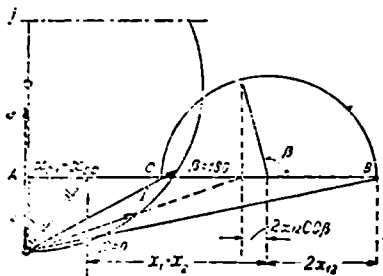
ამგვარად, ასეთი რეაქტიული კოჭას დენის ძალა შესაძლებელია განსაზღვრულ იქნეს გამოსახულებიდან:

$$i = \frac{U_1}{Z_3} = \frac{U_1}{(r_1+r_2) + j(x_{s1}+x_{s2}+x_1+x_2+2x_{12}\cos\beta)} \quad (27,4)$$

r_1 და r_2 სტატორისა და როტორის გრაგნილების აქტიური წინააღმდეგობებია.

როტორის β კუთხით მობრუნების დროს კოქას სრული წინააღმდეგობა ნახ. 375-ის თანახმად იცვლება AB ხაზის გასწვრივ.

მოვახდენთ რა წინააღმდეგობის AB სწორი ხაზის ინვერსირებას O წერტილის მიმართ, მივიღებთ წრეხაზს, რომელზეც როტორის β კუთხით მობრუნების შესაბამისად სრიალავს კოქას I დენის ვექტორის ბოლო, თუ $U = \text{const}$. ნახ. 375-ზე ნაჩვენებია I დენის ვექტორის აგება როტორის მობრუნების კუთხით ნებისმიერი β მნიშვნელობისათვის.



ნახ. 375. მოსაბრუნებელი რეაქტიული კოქას დენის დიაგრამა.

ვისარგებლებთ რა დამამაგნიტებელი ძალების დიაგრამით (ნახ. 374), შეგვიძლია ავაგოთ მოსაბრუნებელი რეაქტიული კოქას სრული ვექტორული დიაგრამა.

ნახ. 374-დან გამოვძინარეობს, რომ დროის ნებისმიერი მომენტისათვის რეზულტიური დამამაგნიტებელი ძალა Θ სტატორის დამამაგნიტებელი ძალის მიმართ სივრცეში დაძრულია α

კუთხით. სტატორის დამამაგნიტებელი ძალის აპლიტუდა სივრცეში ემთხვევა იმ კოქას ღერძს, რომელშიც დროის ამ მომენტში დენს აქვს მაქსიმალური მნიშვნელობა. რეზულტიური Θ დამამაგნიტებელი ძალის ღერძი ამ კოქას ღერძს დაემთხვევა $i = \alpha; \omega_1$, დროის შემდეგ. აშკარად, დამამაგნიტებელი ძალის და ნაკადის ვექტორები Θ და Φ დროულ ვექტორულ დიაგრამაზე α კუთხით უნდა ჩამორჩებოდეს \vec{I} ვექტორს.

დროულ ვექტორულ დიაგრამას ვაგებთ შემდეგნაირად (ნახ. 376).

დენის \vec{I} ვექტორი გადავდოთ პოარიზონტალურად. ნაკადის ვექტორი $\vec{\Phi}$ დენის \vec{I} ვექტორს ჩამორჩება α კუთხით.

სტატორის ე. მ. ძ.-ის \vec{E}_1 ვექტორი 90° -ით ჩამორჩება ნაკადის $\vec{\Phi}$ ვექტორს და $\frac{\pi}{2} + \alpha$ კუთხით დენის \vec{I} ვექტორს. როტორის ე. მ. ძ.-ის

\vec{E}_2 ვექტორი β კუთხით უსწრებს სტატორის ე. მ. ძ.-ის \vec{E}_1 ვექტორს, ვინაიდან არეს ინდუქციური ხაზები როტორის გრაგნილის ფაზებს გადაკვეთს უფრო ადრე, ვიდრე სტატორის გრაგნილის შესაბამის ფაზებს. უნდა გვახ-

სოვდეს, რომ ჩვენ ვიხილავთ შემთხვევას, როდესაც როტორი მობრუნებული არის ბრუნვის საწინააღმდეგო მიმართულებით არეს შემხვედრად.

სტატორის გრაგნილზე მოდებული U_1 ძაბვა ტოლია:

$$U_1 = -(\dot{E}_1 + \dot{E}_2) + I(r_1 + r_2) + jI(x_{s1} + x_{s2}) = -\dot{E} + IZ. \quad (27,5)$$

რეაქტიული კოქს როტორის მობრუნებისას მისი მაგნიტური ენერგია აცვლება აქ რეაქტიული წინააღმდეგობის პროპორციულად. ამიტომ β კუთხის ცვალებადობის დროს წარმოიშევა, ელექტრომაგნიტური მომენტი, რომელიც ცდილობს მოაბრუნოს როტორი $\beta=0$ მდებარეობაში, რომელშიც კოქს მაგნიტურ ენერგიას მაქსიმალური მნიშვნელობა აქვს. ნაწ. 1, § 2-ის თანახმად ეს მომენტი მაგნიტური ენერგიის მობრუნების კუთხით პირველი წარმოებულის ტოლია, ე. ი. ჩვენს შემთხვევაში $M \equiv \frac{dW}{d\beta} = \sin \beta$.

ღ) სამუაზა ინდუქციური რეგულატორი. ასინქრონული მანქანა დამუხრუქებულ მდგომარეობაში ($S=1$) ძალზე ხშირად გამოიყენება, ნახ. 377-ის სქემის მიხედვით. ჩართვის ამ სქემას ინდუქციური რეგულატორის სქემა ეწოდება.

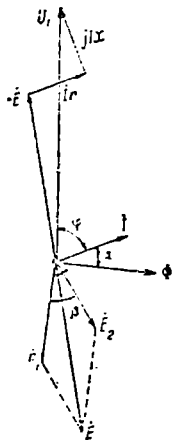
ასინქრონული მანქანის ერთ-ერთი გრაგნილი გამოყენებულია, როგორც აღზნების გრაგნილი (პირველადი გრაგნილი) და მიერთებულია უშუალოდ ქსელთან.

მეორე გრაგნილი მიმდევრობითაა ჩართული წრედთან, რომლის ძაბვაც უნდა ვარეგულიროთ. ამ გრაგნილში დენი, მხოლოდ დატვირთვის დროს გადის (ნახ. 378).

პრაქტიკულად უფრო ხშირად პირველად გრაგნილს წარმოადგენს როტორის გრაგნილი¹. სტატორის გრაგნილით სწარმოებს ქსელის U_1 ძაბვის შემთხვევაში მომხმარებლის U_2 ძაბვის აწევა ან დაწევა.

ნახ. 378-დან ჩანს, რომ ინდუქციური რეგულატორი წარმოადგენს მოსაბრუნებელ ავტოტრანსფორმატორს და მისი სქემა შეიძლება წარმოვიდგინოთ ნახ. 379-ზე მოცემული სახით. დატვირთვის A, B და C მომკერებზე U_2 ძაბვა განსხვავებული იქნება a, b, c მომკერებზე U_1 ქსელის ძაბვისაგან, იმის გამო, რომ ქსელის ფაზურ U_{1a}, U_{1b}, U_{1c} ძაბვებს გეომეტრიულად ემატება მეორადი გრაგნილის სათანადო ფაზებში მბრუნავი არეს მიერ დაინდუქტირებული E_{2a}, E_{2b}, E_{2c} ე. მ. ძ. ბი.

ძაბვების ვექტორული დიაგრამა, როტორის მობრუნების β კუთხისათვის ინდუქციური რეგულატორის უქმი სელის დროს მოცემულია ნახ. 390-ზე.



ნახ. 376. მოსაბრუნებელი რეაქტიული კოქსის ვექტორული დიაგრამა.

¹ როტორზე ყოველი ფაზის ორი ბოლოს გამოყენების თავიდან ასაცილებლად.

ნახ. 380-დან Δ ფაზისათვის ვღებულობთ:

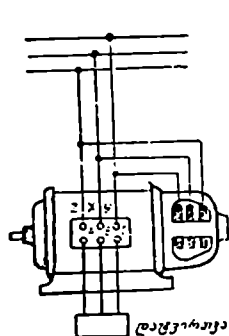
$$U_{2A} = \sqrt{U_{1a}^2 + E_{2a}^2 + 2U_{1a} \cdot E_{2a} \cdot \cos\beta} \quad (27,6)$$

β კუთხის სიდიდის ცვლის დროს U_{2A} ვექტორის ბოლო (შესაბამისად U_{1B} და U_{2C}) სრილუბს E_{2a} რადიუსის წრეხაზზე.

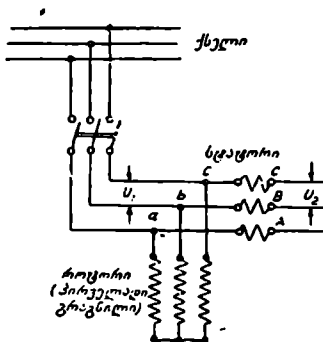
განვიხილოთ პირველადი და მეორადი წრედების დენების თანაფარდობა.

როტორის მობრუნების β კუთხისაგან დამოკიდებულებით.

დაეუშვათ, რომ სტატორისა და როტორის გრაგნილები ერთნაირადაა განაწილებული საპეროდოტრეხოს გასწვრივ, ამასთან პირველად გრაგნილს წარმოადგენს როტორის გრაგნილი. სტატორის გრაგნილში გადის დატვირთვის I_2 დენი. გამარტივების მიზნით დასა-

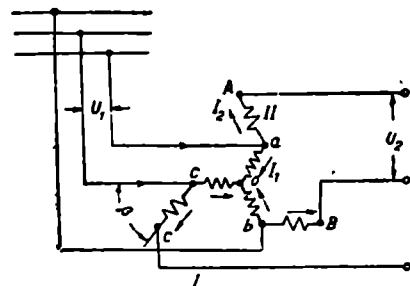


ნახ. 377.

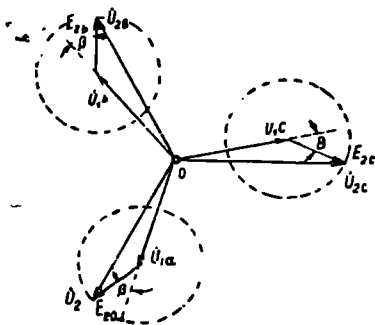


ნახ. 378. სამუხაზ ინდუქტიური რეგულატორის ჩართვის სქემა.

წყისში უგულვებელვყოთ როტორის დამამაგნიტებელი დენი. როტორის გრაგნილში გაივლის I_1 დენი და მის მიერ შექმნილი დამამაგნიტებელი, ძალა kI_1a , გააწონასწორებს სტატორის kI_2a_2 დამამაგნიტებელ ძალას.



ნახ. 379.



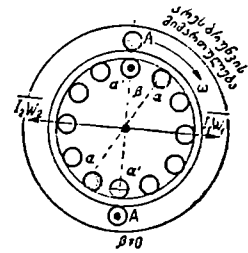
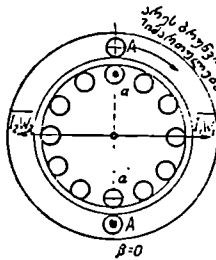
ნახ. 380.

ნახ. 381-ზე წარმოდგენილია დროის მომენტი, როდესაც I_1 და I_2 დენებს A და a ფაზებში მაქსიმალური მნიშვნელობა აქვს. ამასთან $\beta = 0$. ნახაზის გამარტივებისათვის სტატორზე ნაჩვენებია მხოლოდ A ფაზა.

მოგაბრუნოთ როტორი β კუთხით, ვთქვათ არეს ბრუნვის მიმართულებით.

თუ წინანდებურად განვიხილავთ მომენტს, როდესაც I_2 დენი A ფაზაში აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას, ცხადია, იმისათვის, რომ არ დაირღვეს დამამაგნიტებელი ძალების წონასწორობა, როტორის გრაგნილის α ფაზაში უკვე აღარა

გვაქვს მაკონპენსირებელი დენის მაქსიმალური მნიშვნელობა, როგორც ეს წინათ გვექონდა. როტორის არეს ლერძი დროის ამ მომენტში α ხვევის სიბრტყის პერპენდიკულარული იქნება და

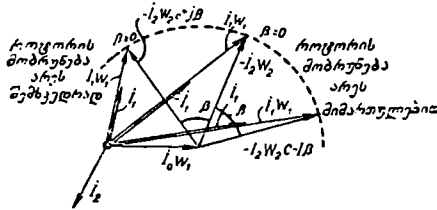


მხოლოდ $i = \frac{\beta}{\omega}$ დროს (ნახ. 382).

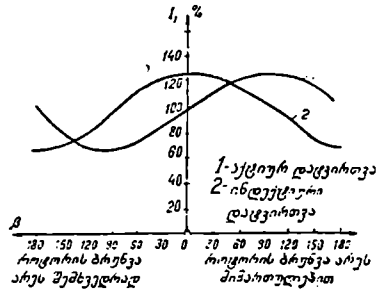
ნახ. 381. ინდუქტიური რეგულატორის სტატორისა და როტორის დამამაგნიტებელი α ხვევის (ფაზის) ძალა, როდესაც $\beta=0$.

ნახ. 382. ინდუქტიური რეგულატორის სტატორისა და როტორის დამამაგნიტებელი ძალა, როდესაც $\beta \neq 0$.

არეს ბრუნვის მიმართულებით როტორის β კუთხით მობრუნების შემთხვევაში როტორის გრაგნილის I_1 მაკონპენსირებელი დენი β —დროული კუთხით



ნახ. 383.



ნახ. 384.

უნდა იყოს ჩამორჩენილი იმ მდებარეობიდან ვექტორულ დიაგრამაზე, რომელიც მას ეკიბა $\beta=0$ დროს.

ნახ. 383-ზე ნაჩვენებია პირველადი გრაგნილის დენების ვექტორული დიაგრამა I_2 მეორადი დენის მულმივი მნიშვნელობისათვის, დამამაგნიტების დენის $I_0 \approx c \sin \alpha$ მხედველობაში მიღებით.

ნახ. 383-ის განხილვიდან გამოდინარობს, რომ, როდესაც $\beta=0$ ინდუქტიური რეგულატორის დენების ვექტორული დიაგრამა ავტოტრანსფორმატორის დენების ვექტორული დიაგრამის მსგავსია. პირვე-

ლად ქსელში განავალი დენი ტოლია $I_1 - I_2$, როტორის β კუთხით მობრუნებისას შესაბამისად იცვლის ფაზას I_1 დენი და პირველადი ქსელის დენი.

როგორც ვექტორული დიაგრამიდან ჩანს ბრუნვის არეს მიმართულებით ან საწინააღმდეგოდ როტორის β კუთხით მობრუნების შემთხვევაში როტორის დამამაგნიტებელი ძალა მიიღება ტოლი

$$kI_1 a_1 = kI_0 a_1 - kI_2 a_2 e^{\pm j\beta},$$

საიდანაც ვიღებთ

$$I_1 = I_0 - I_2 k_{21} e^{\pm j\beta}. \quad (27,7)$$

ნახ. 384-ზე მოყვანილია დამახასიათებელი მრუდები $I_1 = f(\beta)$, მეორად წრედში აქტიური და ინდუქტიური დატვირთვების შემთხვევაში, თუ $I_2 = \text{const}$. ვინაიდან ჯოჯოხის დანაკარგები დენის კვადრატის პროპორციულია, ანტიომ, როგორც ნახ. 384-დან ჩანს, როტორის მობრუნებისას მათა სიდიდე იცვლება. ამის გამო ინდუქციური რეგულატორის გამოყენების დროს

უნდა დავადგინოთ ეკონომიური რეგულირების ზონა და რეგულატორი ვამუშაოთ ამ ზონაში.

ინდუქციური რეგულატორის, ისევე როგორც ფაზორეგულატორის საშუალებით, შესაძლებელია განვახორციელოთ ფიქტიური ინდუქციური ან ტევადური დატვირთვა.

ინდუქციური რეგულატორები გამოიყენება ცალკეულ ფიდერებში ანდა სადგურის სალტებზე ძაბვის რეგულირებისათვის, ცალკეულ მიმღებებთან ძაბვის ფართო ფარგლებში რეგულირებისათვის (ვერცხლისწყლიანი გამმართველები, ერთ ლუზა გარდამსახები და სხვ). ინდუქციური რეგულატორები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს იმავე სქემებში, რომლებშიც გამოიყენება ნორისის ან კოხი და შტერცელის ფორმის რეგულატორები.

ლაბორატორიულ პირობებში ისინი

ფრიად მოსახერხებელია ისეთი ცდების ჩასატარებლად, რომლებიც მოითხოვენ ძაბვის მდოვრე რეგულირებას.

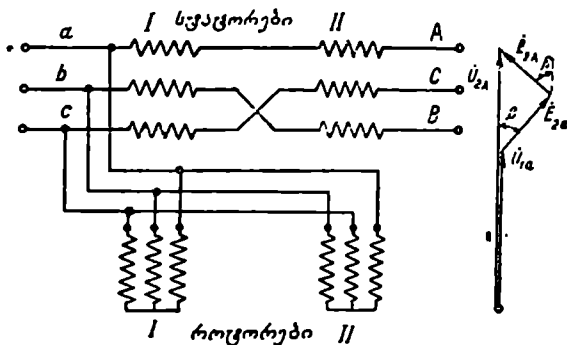
ამ მიზნით ჩვეულებრივად გამოიყენება ნორმალური ასინქრონული ძრავები. როტორის მობრუნება ხდება კია გადაცემის საშუალებით.

ინდუქციური რეგულატორის სამრეწველო გამოყენების შემთხვევაში ხნარობენ მის სპეციალურ კონსტრუქციას ზეთის ბუნებრივი ან ხელოვნური ვაიცეებით (ნახ. 385).

ზემოთ აღწერილ ინდუქციურ რეგულატორებს აქვთ ორი თვისება, რომლებიც ზოგიერთ შემთხვევაში შესაძლებელია განხილულ იქნეს როგორც

მათი ნაკლი. რეზულტიურ მაგნიტური არესა და როტორის დენის ურთიერთ ქმედება ქმნის მაბრუნ მომენტს, რომელიც ცდილობს მოაბრუნოს როტორი და მოითხოვს როტორის სპეციალურ დამაგრებას. ამის გარდა ძაბვის რეგულირება დაკავშირებულია მისი ფაზის ცვლასთან. ამ ნაკლის თავიდან აცილების მიზნით შეიძლება გამოყენებულ იქნეს შეწყვილებული ინდუქციური რეგულატორის ნახ. 386-ზე მოყვანილი სქემა.

ორი რეგულატორის სტატორები ჩართულია მიმდევრობით, ხოლო როტორები პარალელურად, არეს ბრუნვის მიმართულეა რეგულატორებში



ნახ. 386.

საწინააღმდეგოა. რეგულატორის ერთ ლილვზე დამაგრების შემთხვევაში რეზულტიური მაბრუნ მომენტი ნულის ტოლი იქნება. როტორების მობრუნების დროს სტატორების ე. მ. ძ.-ში დაიძვრება ურთიერთ საწინააღმდეგო მიმართულებით: ამიტომ ძაბვები შეწყვილებულ რეგულატორამდე და მის შემდეგ პრაქტიკულად ფაზით დაემთხვევა ერთმანეთს, რაც ნათლად ჩანს ნახ. 386-ის ვექტორული დიაგრამიდან, რომელიც აგებულია იმ შემთხვევისათვის, როდესაც სტატორის დენი უდრის ნულს.

28. მბრუნავი მრავალფაზა ასინქრონული ძრავის გუშა პროცესის მიხედნა ტრანსფორმატორის გუშა პროცესისად

ა) ხაერთო დებულებები. მბრუნავი ასინქრონული მანქანის გუშა პროცესის თავისებურებას შეადგენს ის, რომ მასში აღდგილი აქვს პირველად გარგნილზე მოყვანილი ელექტროენერგიის გარდაქმნის მექანიკურ ენერგიად (მანქანის ლილვზე), მისი ძრავლ რეჟიმში გუშაობის შემთხვევაში და, პირიქით, თუ ის გუშაობს გენერატორულ რეჟიმში.

ამავე დროს დამუხრუჭებულ მდგომარეობაში (ნაწ. IV, § 27), ენერგიის გარდაქმნის თვალსაზრისით ასინქრონული მანქანა სრულიად ანალოგიურია ტრანსფორმატორის.

ამიტომ სავსებით გასაგებია მისწრაფება—გავამარტივოთ მბრუნავი

ასინქრონული მანქანის მუშაობის ანალიზი—დავიყვანოთ ის ტრანსფორმატორის მუშაობის ანალიზამდე.

ამ მიზნით მბრუნავ ასინქრონულ მანქანას ცვლიან ყველა ენერგეტიკული თანაფარდობების თვალსაზრისით ეკვივალენტური დამუხრუჭებულ როტორიანი ასინქრონული მანქანით. შემდგომი ანალიზის გამარტივების მიზნით, განვიხილავთ ორპოლუსა ($2P=2$) ასინქრონულ მანქანას.

ამ შემთხვევაში, არეს ბრუნვის კუთხური სიჩქარე სივრცეში რიცხობრივად სტატორის გრაგნილში გამავალი დენის კუთხური სიჩქარის ტოლია.

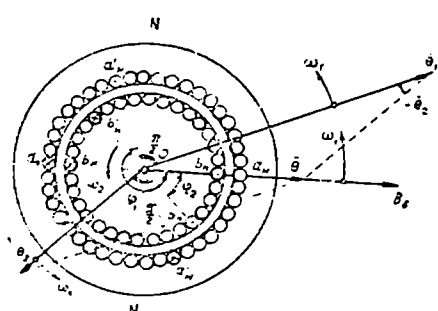
სტატორისა და როტორის გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალების განაწილება საპაერო ღრეჩოს წრეხაზის გასწვრივ ჩავთვალოთ სინუსოიდურად, ე. ი. განვიხილოთ სტატორისა და როტორის გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალების მხოლოდ ძირითადი ჰარმონიკები. ყველა ძაბვები და დენები ჩავთვალოთ ასევე სინუსოიდურად.

მსჯელობის გამარტივების მიზნით დასაწყისში დაუშვათ, რომ სტატორისა და როტორზე გვაქვს განაწილებული გრაგნილები, ამასთან ხვევთა რიცხვი ფაზათა რიცხვის ტოლია, ასე რომ $m_1 = w_1$; $m_2 = w_2$.

ამ დაშვების შემთხვევაში მიღებული შედეგები ცხადია სამართლიანია იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $m_1 \neq w_1$; $m_2 \neq w_2$ და კერძოდ სამფაზა მანქანისათვის.

ასინქრონული ძრავის მუშაობის ანალიზი დავიწყოთ, სტატორის და როტორის გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალის ანალიზით.

ბ) ასინქრონული ძრავის დამამაგნიტებელი ძალების სივრცული ვექტორული დიაგრამა. ვთქვათ, სტატორის m_1 -ფაზა გრაგნილი იკვებება m_1 -ფაზა სიმეტრიული სინუსოიდური დენით. დიაგრამის აგება დავიწყოთ რეზულტიური Θ დამამაგნიტებელი ძალიდან, ჩავთვლით რა მას მოცემულად, და მოვძებნით მის მდგენელებს Θ_1 და Θ_2 -ს, რომლებიც შექმნილია სტატორის და როტორის დენებით. Θ დამამაგნიტებელი ძალის მრუდის მაქსიმუმი და არეს მაქსიმალური ინდუქციის ვექტორი საპაერო ღრეჩოში გადაადგილდება ω_1 კუთხური სიჩქარით, ამიტომ სივრცულ ვექტორულ დიაგრამაზე დამამაგნიტებელი ძალის და $B\theta$ ინდუქციის ვექტორები ბრუნავს იგივე ω_1 კუთხური სიჩქარით (ნახ. 387).



ნახ. 387. ასინქრონული ძრავის ე. მ. დ. სივრცული დიაგრამა.

როტორი ბრუნავს არეს წინმართულეპით კუთხური სიჩქარით $\omega_2 = (1-S)\omega_1$. ვინაიდან სრიალი S დადებითია ($\omega_1 > \omega_2$), როტორის გამტარები არეს მიმართ გადაადგილდება არეს

ბრუნვის საწინააღმდეგო მიმართულებით. ეს შენიშვნა მხედველობაში უნდა ვექონდეს როტორის გრაგნილში მბრუნავი არეს მიერ აღძრული ე. მ. დ.-ის მიმართულების განსაზღვრისას.

დროის მომენტისათვის, რომელიც ნახ. 337-ს შეესაბამება მაქსიმალური ე. მ. დ. აღძვრება სტატორის $a_{H\alpha}$ და როტორის $b_{H\beta}$ ხვევებში (ფაზებში). განვიხილოთ როტორის გრაგნილი.

დროის მოცემული მომენტისათვის E_2 ე. მ. დ.-ას მაქსიმალური მნიშვნელობა აქვს $b_{H\beta}$ ხვევში. მისი მიმართულება განისაზღვრება მარჯვენა ხელის წესით, მივიღებთ რა მხედველობაში არესა და გამტარის ფარდობით ძრაობას.

I_2 დენის ძალა როტორის გრაგნილში როტორის გრაგნილის ინდუქტიური წინააღმდეგობის გამო ფაზით ჩამორჩება E_2 ე. მ. დ.-ს, ამიტომ დროის განსახილველი მომენტისათვის როტორის დენის მაქსიმალური მნიშვნელობა გვექნება $b'_{H\beta}$ ფაზაში, რომელიც, რაღაც ψ_2 კუთხითაა დაძრული $b_{H\beta}$ ფაზის მიმართ არეს ბრუნვის შემხედვარად, ვინაიდან $b'_{H\beta}$ ფაზის ე. მ. დ. ψ_2 კუთხის შესაბამის დროით აღრე აღწევს თავის მაქსიმუმს. როტორის ყველა ფაზების მიერ შექმნილი Θ_2 დამამაგნიტებელი ძალის ამპლიტუდა ემთხვევა როტორის იმ ფაზის ღერძს, სადაც დროის ამ მომენტში დენს აქვს მაქსიმალური მნიშვნელობა. ე. ი. $b'_{H\beta}$ ფაზის ღერძს, ამიტომ Θ_2 დამამაგნიტებელი ძალის ვექტორი $b'_{H\beta}$ ხვევის სიბრტყის მართობულადაა მიმართული. Θ_2 ვექტორის სიგრძე როტორის წრედის ზონაცემებით განისაზღვრება.

ვიცით რა Θ და Θ_2 ვექტორების მიმართულება და ამპლიტუდა, ადვილი მოსაძებნია სტატორის გრაგნილის Θ_1 დამამაგნიტებელი ძალის ვექტორის ამპლიტუდა და მიმართულება და, მაშასადამე სტატორის გრაგნილის ფაზა (ხვევი) $a'_{H\alpha}$, სადაც დროის მოცემულ მომენტში სტატორის I_1 დენს ამპლიტუდური მნიშვნელობა აქვს. $a'_{H\alpha}$ და $a_{H\alpha}$ ხვევებს შორის ძვრის კუთხე $\psi_1 > \pi$ და კერძო შემთხვევაში, როდესაც $I_2 = 0$, $\Theta_2 = 0$; ისე რომ $\Theta_1 = \Theta$ და $\psi_1 = \frac{3}{2}\pi$. დროის შემდეგ მონენტებში მბრუნავი არეს B_2 ინდუქციის და

Θ დამამაგნიტებელი ძალის ვექტორების მდებარეობის შესაბამისად ე. მ. დ.-ების და დენების მაქსიმუმი გვექნება როტორისა და სტატორის სხვა ფაზებში. ამასთან დამყარებული პროცესის დროს ($I_2 = \text{const}$) არც ψ_2 და ψ_1 კუთხეები და არც დამამაგნიტებელი ძალების პარალელოგრამი არ შეიცვლება.

თუ როტორის ბრუნვის სიჩქარე შეიცვლება (შეიცვლება ძრავის დატვირთვა), შეიცვლება დამამაგნიტებელი ძალების პარალელოგრამის მდგენელებიც (Θ_1 , Θ_2 , Θ). მაგრამ დამამაგნიტებელი ძალების ვექტორები Θ_1 და Θ_2 სივრცეში ყოველთვის იბრუნებს ერთი და იგივე კუთხური სიჩქარით. ეს უკანასკნელი შეესაბამება ყოველი ელექტრული მანქანის მუშაობის ძირითად პრინციპს, რომლის თანახმადაც პირველადი და მეორადი გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალების ფარდობითი სიჩქარე ნულის ტოლია.

შევამოწმოთ ეს დებულება შემდეგი მარტივი გამოთვლითაც.¹

სტატორის დამამაგნიტებელი ძალა Θ_1 საპერო ღრეოში გადაადგილება მუდმივი ω_1 სიჩქარით.

როტორი ბრუნავს ცვლადი კუთხური სიჩქარით $\omega_2 = (1-S)\omega_1$, ამასთან როტორის გრაგნილში გადის $\frac{\omega_2}{2\pi} = f_2 = S \frac{\omega_1}{2\pi} = S f_1$ სიხშირის დენები. ცხადია, რომ როტორის დამამაგნიტებელი ძალა Θ_2 როტორის გრაგნილის მიმართ გადაადგილდება $\omega_2 = f_2 \lambda_1$ სიჩქარით, იგივე მიმართულებით, როგორცაა მბრუნავი არე.

დავუმატებთ რა ამ ω_2 სიჩქარეს როტორის ბრუნვის საკუთარ ω_1 სიჩქარეს, მივიღებთ როტორის Θ_2 დამამაგნიტებელი ძალის რეზულტიურ კუთხურ სიჩქარეს სივრცეში.

$$\omega_1 + \omega_2 = S\omega_1 + (1-S)\omega_1 = \omega_1.$$

ამგვარად, მივდივართ შემდეგ დასკვნამდე:

1. ნებისმიერი სრიალის დროს Θ_1 და Θ_2 დამამაგნიტებელი ძალები უძრავია ერთმანეთის მიმართ;
2. დამამაგნიტებელი ძალების პარალელოგრამი ბრუნავს სივრცეში, რჩება რა უცვლელი დამყარებული პროცესის დროს.
3. როტორის დამამაგნიტებელი ძალა Θ_2 როტორის მიმართ გადაადგილდება სიჩქარით $\omega_2 = f_2 \lambda_1$.
4. როტორის დამამაგნიტებელი ძალა Θ_2 სივრცეში ბრუნავს ω_1 კუთხური სიჩქარით.

თუ პირველად გრაგნილად გამოვიყენებთ როტორის გრაგნილს, მივაერთებთ რა მას საკონტაქტო რგოლების საშუალებით ქსელთან, მაშინ როტორის დამამაგნიტებელი ძალა Θ_1 როტორის ზედაპირის მიმართ გადაადგილდება ω_1 კუთხური სიჩქარით, ხოლო როტორი კი იბრუნებს საწინააღმდეგო მიმართულებით ω_2 კუთხური სიჩქარით, ისე, რომ სივრცეში დამამაგნიტებელი ძალის ბრუნვის სიჩქარე ტოლი იქნება $\omega_1 - \omega_2 = \omega_1$. იმავე სიჩქარით და იმავე მიმართულებით გადაადგილდება სტატორის დამამაგნიტებელი ძალა Θ_2 . ასინქრონულ მანქანას, რომლის კვება ხდება როტორის მხრიდან, შექცეული მანქანა ეწოდება.

ასინქრონული ძრავის დამამაგნიტებელი ძალების ნახ. 387-ზე მოცემული დიაგრამა (დამამაგნიტებელი ძალების პარალელოგრამი) გარეგნულად ტრანსფორმატორის დამამაგნიტებელი ძალების პარალელოგრამის მსგავსია, მაგრამ აუცილებლად უნდა გვახსოვდეს, რომ ტრანსფორმატორში გვაქვს დამამაგნიტებელი ძალების დროული დიაგრამა, აქ კი სივრცული.

ბ) სტატორის წრედის ვექტორული დიაგრამა. ვისარგებლებთ რა ნახ. 387-ის სივრცული დიაგრამით, შესაძლებელია ავაგოთ დიაგრამა, რომელიც ამყარებს დროით კავშირს θ , ნაკადსა, I_1 დენსა, E_1 ე. მ. ძ.-სა და სტატორის გრაგნილზე მოდებულ U_1 ძაბვას შორის.

ნახ. 387-ზე წარმოდგენილი დროის მომენტისათვის E_1 ე. მ. ძ.-ს მაქსიმუმი აქვს $a_{11}a_{21}$ ფაზაში.

I_1 დენის ძალას მაქსიმუმი აქვს $a'_{21}a'_{11}$ ფაზაში. $a_{11}a_{21}$ ფაზაში კი ის $i = \psi_1$; ω_1 დროის შემდეგ იქნება მაქსიმალური.

ამგვარად, როდესაც $2P=2$, სივრცული კუთხე ψ_1 უდრის სტატორის გრაფილის $a_{11}a_{22}$ ფაზაში E_1 ე. მ. დ.-სა და I_1 დენს შორის ძვრის დროულ-კუთხეს. $a_{11}a_{22}$ ხვევის გაშვოლი Φ მაგნიტური ნაკადი თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს მაშინ, როდესაც \vec{M} ვექტორი ამ ხვევის სიბრტყის მართობია და ემთხვევა $N'N$ ღერძს (ნახ. 387). მაშასადამე, დროული ვექტორი

$$\frac{\pi}{2} \text{ კუთხით უსწრებს } E_1 \text{ ვექტორს.}$$

Θ_1 , Θ_2 და Θ დამამაგნიტებელი ძალები შეიძლება განხილული იქნეს არა მხოლოდ როგორც სივრცული ვექტორები, არამედ, როგორც დროული ვექტორებიც, თუ მხედველობაში მივიღებთ მათი მყისა მნიშვნელობების ცვლილებას მოცემული ფაზის ღერძის გასწვრივ. Θ_1 დამამაგნიტებელი ძალა მაქსიმალურ მნიშვნელობას ფაზის ღერძის გასწვრივ აღწევს მაშინ, როდესაც ამ ფაზის I_1 დენი აღწევს თავის აპლიტუდურ მნიშვნელობას, ამიტომ Θ_2 დამამაგნიტებელი ძალა, როგორც დროული ვექტორი, ყოველთვის დამთხვეულია ფაზით I_1 დენთან. რამდენადაც Θ_1 , Θ_2 , Θ დამამაგნიტებელი ძალები, როგორც სივრცული ვექტორები ქმნის ჩაკეტილ სამკუთხედს, იმდენად დროულ ვექტორულ დიაგრამაზეც ინარჩუნებენ იგივე ურთიერთ განლაგებას.

სტატორისა და როტორის ფოლადის ფურცლებში ჰისტერეზის მოვლენისა და გრიგალური დენების არსებობის გამო Φ ვექტორი, რაღაც α კუთხით ჩამორჩება რეზულტიურ დამამაგნიტებელი ძალის ვექტორს.

ასინქრონული ძრავის სტატორის წრედის დროული დიაგრამა ნაჩვენებია ნახ. 388-ზე. როგორც ნახ. 388-დან ჩანს ეს ვექტორული დიაგრამა იგივეა, რაც ტრანსფორმატორის პირველადი წრედის ვექტორული დიაგრამა.

სტატორის წრედის ძაბვების განტოლება შესაძლებელია წარმოდგენილი იქნეს შემდეგი სახით:

$$U_1 = -E_1 + I_1 Z_1, \quad (28,1)$$

სადაც $Z_1 = r_1 + jx_1$ — სტატორის ფაზის სრული წინააღმდეგობაა, რომელიც გაპირობებულია r_1 ოქტიური და x_1 — ფანტვის ინდუქტიური წინააღმდეგობით.

ღ) როტორის წრედის ვექტორული დიაგრამები. მბრუნავი არე როტორის გრაფილში აღძრავს E_2 ე. მ. დ.-ს. როტორის გრაფილში გამავალი I_2 დენის ტოლია:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + (S\omega_1 L_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}, \quad (28,2)$$

სადაც L_2 — როტორის ფაზის ფანტვის ნაკადით გაპირობებული ინდუქტიობაა, ხოლო $x_2 = \omega_1 L_2$.

I_2 დენსა და E_2 ე. მ. დ.-ს შორის ძვრის კუთხე განისაზღვრება შეფარდებიდან:

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{sx_2}{r_2}. \quad (28,3)$$

როტორის წრედის ვექტორული დიაგრამა წარმოდგენილია ნახ. 389-ზე.

როტორის გრაგნილში აღძრული ელექტრომაგნიტური ძალა ტოლია.

$$E_2 = 4,44 S I_2 k_{2\omega} \omega_2 \Phi.$$

რადგან s სრიალის ცვლილების დროს Φ ნაკადიც იცვლება, ამიტომ E_2 ე. მ. დ. წარმოადგენს სრიალის რთულ ფუნქციას.

ანალიზის გამარტივებისათვის შემოაქვთ სიდიდე

$$E_2 = \frac{E_{2s}}{s} = 4,44 K_{2\omega} f_1 \omega_2 \Phi, \text{ რომელიც ისე, როგორც}$$

სტატორის ე. მ. დ. E_1 , წარმოადგენს მხოლოდ ნაკადის ფუნქციას. ეს ტოლფასია s სრიალით მბრუნავი როტორის უძრავი როტორით შეცვლისა Φ ნაკადის იგივე მნიშვნელობისათვის. ასეთი შეცვლის დროს ენერგეტიკულ შეფარდებებს როტორის წრედში უცვლელად ტოვებენ.

განვიხილოთ ასეთი შეცვლის პირობები.

გარდაეკმნათ I_2 დენის გამოსახულება:

$$I_2 = \frac{s E_2}{\sqrt{r_2^2 + (s x_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}} = I_2' \quad (28,4)$$

ნახ. 388.

მაშასადამე, როტორის წრედში E_2 ე. მ. დ-ის არსებობისას, დენის ძალა როტორში დარჩება უცვლელი, თუ წრედის წინააღმდეგობას s -ჯერ შევამცირობთ; ამ დროს როტორის წრედში დენის ძალასა და ე. მ. დ-ას შორის ძერის კუთხე არ იცვლება:

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_2}{\frac{r_2}{s}} = \frac{s x_2}{r_2} = \operatorname{tg} \psi_2'.$$

ეკვივალენტურ უძრავ როტორში შთანთქმული

ლი სრული სიმძლავრე ტოლია: $P_{12} = m_2 I_2'^2 \frac{r_2}{s}$.

ამ სიმძლავრის ნაწილი იხარჯება ჯოულის დანაკარგებზე¹. დანარჩენი ნაწილი კი, რომელიც ტოლია

$$P_2' = m_2 I_2'^2 \frac{r_2}{s} - m_2 I_2'^2 r_2 = m_2 I_2'^2 r_2 \frac{1-s}{s}, \quad (28,5)$$

რეალურ მანქანაში გარდაეკმნება მექანიკურ სიმძლავრედ ძრავის ლილვზე, ხოლო ეკვივალენტურ უძრავ როტორში კი ჯოულის სითბოდ.

¹ როტორის ფოლადში დანაკარგები შეგვიძლია უგულებელვყოთ, რადგანაც მცირე სრიალის დროს f_2 სიხშირე მცირეა, ხოლო დიდი სრიალისათვის ფოლადში დანაკარგები მცირეა, როტორის გრაგნილში დანაკარგებთან შედარებით.

ძრავის ლილვზე განვითარებული ბრუნვის მომენტი ტოლია:

$$M = \frac{P_2^1}{\omega_2} = \frac{m_2 I_2^2 r_2 \frac{(1-s)}{s}}{\omega_2 \cdot l} = \frac{m_2 I_2^2 r_2}{\omega_1 \cdot s} = \frac{P_{12}}{\omega_1} \quad (28,6)$$

ეს ტოლობა გვიჩვენებს, რომ ასინქრონული ძრავის ბრუნვის მომენტი შესაძლებელია მოინახოს ერთის მხრივ ძრავის ლილვზე P_2^1 სიმძლავრის გაყოფით როტორის ბრუნვის ω_2 კუთხურ სიჩქარეზე, მეორეს მხრივ კი მაგნიტური არეს მიერ სტატორიდან როტორზე—გადაცემული P_{12} სიმძლავრის გაყოფით არეს ბრუნვის ω_1 კუთხურ სიჩქარეზე.

ასინქრონული ძრავის მუშაობის ანალიზისათვის მეტიად მნიშვნელოვანია როტორში ჯოულის დანაკარგებსა და სრიალს შორის დამოკიდებულება.

$$\frac{m_2 I_2^2 r_2}{P_{12}} = \frac{m_2 I_2^2 r_2}{m_2 I_2^2 \frac{r_2}{s}} = s.$$

ამ ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ სრიალი რიცხობრივად უდრის როტორის ჯოულის დანაკარგების შეფარდებას სტატორიდან როტორზე გადაცემულ სიმძლავრესთან.

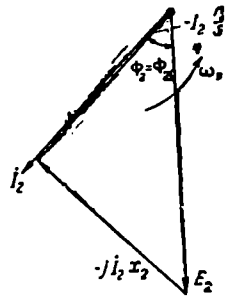
ამგვარად, მბრუნავი როტორის ეკვივალენტური უძრავი როტორით შენაცვლების დროს უნდა მოვახდინოთ შემდეგი შეცვლა:

$E_2 = sE_2$ -ის ნაცვლად მივიღოთ E_2 .

$r_2 = \text{const}$ -ის ნაცვლად მივიღოთ $\frac{r_2}{s}$.

$s x_2$ -ის ნაცვლად მივიღოთ $x_2 = \text{const}$.

და ცვალებადი $f_2 = s f_1$ სიხშირის მქონე I_2 დენის ნაცვლად მივიღოთ იგივე ეფექტური მნიშვნელობის I_2 დენი, მხოლოდ მულტიპლი f_1 სიხშირით.



ნახ. 390.

ამ შემთხვევაში ყველა ენერგეტიკული შეფარდებები დარჩება უცვლელი. ეკვივა: ლენტურ როტორში ე. მ. ძ.ებისა და დენების სიხშირე უდრის f_1 . ეკვივალენტური როტორისათვის ექვტორული დიაგრამა მოცემულია ნახ. 390-ზე.

აღვნიშნოთ ძირითადი პრინციპიალური განსხვავება ნახ. 389 და ნახ. 390 დიაგრამებს შორის.

ნახ. 389-ზე მოცემული დიაგრამა ეკუთვნის როტორის გარკვეულ ფაზას და სავსებით შეესაბამება როტორის აღებულ ფაზაში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს.

ნახ. 390-ის დიაგრამა ეკუთვნის ეკვივალენტური უძრავი როტორის ფაზას, და აადვილებს რა მანქანის მუშაობის ანალიზს, იძლევა სწორ რაოდენ-

ნობრივ თანათფარდობებს, თუმცა არ შეესაბამება მთლიანად როტორში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს.

ე) სტატორისა და როტორის წრედების შეთავსებული ვექტორული დიაგრამა. როტორის წრედის f_1 სიხშირესთან მიყვანილი ვექტორული დიაგრამა (ნახ. 390) შესაძლებელია გავაერთიანოთ სტატორის წრედის ვექტორულ დიაგრამასთან.

სტატორის დიაგრამაში (ნახ. 388).

$$\dot{\Theta}_1 = \dot{\Theta} - \dot{\Theta}_2, \quad (28,7)$$

სადაც ნაწ. III, § 24-ის თანახმად

$$\Theta_1 = 0,45 m_1 k_{1\omega} \frac{I_1 \omega_1}{p};$$

$$\Theta_2 = 0,45 m_2 k_{2\omega} \frac{I_2 \omega_2}{p}$$

და ტრანსფორმატორთან ანალოგიით

$$\Theta = 0,45 m_1 k_{1\omega} \frac{I_0 \omega_1}{p},$$

ამიტომ ტოლობა (28,7) შეიძლება დავწეროთ შემდეგი სახით

$$0,45 \frac{m_1}{p} \omega_1 k_{1\omega} \dot{I}_1 + 0,45 \frac{m_2}{p} \omega_2 k_{2\omega} \dot{I}_2 = 0,45 \frac{m_1}{p} \omega_1 k_{1\omega} \dot{I}_0$$

საიდანაც:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{m_2 \omega_2 k_{2\omega}}{m_1 \omega_1 k_{1\omega}} = \dot{I}_0 \quad \text{ან} \quad \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_0, \quad (28,8)$$

სადაც

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_2 \frac{m_2 \omega_2 k_{2\omega}}{m_1 \omega_1 k_{1\omega}} = \dot{I}_2 k_{21}, \quad (28,9)$$

პირველად გრაფიკულად მიყვანილი მეორადი დენია. ფარდობა K_{21} , დენების ტრანსფორმაციის კოეფიციენტს წარმოადგენს.

ნახ. 391-ზე აგებულია სტატორის წრედის ვექტორული დიაგრამა, I_1^1 და I_0 დენების მხედველობაში მიღებით.

ამ დიაგრამის საფუძველზე განვიხილოთ ენერგეტიკული თანათფარდობანი ასინქრონული მანქანაში და მოვძებნოთ ჩვენთვის უცნობი კუთხე ψ_2^1 .

ქსელიდან სტატორზე მიყვანილი სიმძლავრე ტოლია

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

სადაც

$$U_1 \cos \varphi_1 = E_1 \cos \beta + I_1 r_1,$$

ასე რომ

$$P_1 = m_1 E_1 I_1 \cos \beta + m_1 I_1^2 r_1.$$

ნახ. 391-ის დიაგრამიდან გამომდინარეობს აგრეთვე, რომ

$$I_1 \cos \beta = I_0 \sin \alpha + I_2^1 \cos \psi_2^1,$$

რის გამო

$$P_1 = m_1 I_1^1 r_1 + m_1 E_1 I_0 \sin \alpha + m_1 E_1 I_2^1 \cos \psi_2^1. \quad (28,10)$$

აქ $m_1 I_1^1 r_1$ წარმოადგენს ჯოლის დანაკარგებს პირველად გრაფილში, $m_1 E_1 I_0 \sin \alpha$ სტატორის დანაკარგებს ფოლადში.

სიმძლავრე $P_{12} = m_1 E_1 I_2^1 \cos \psi_2^1$ წარმოადგენს ელექტრომაგნიტურ სიმძლავრეს, რომელიც მბრუნავი არეს მიერ გადაეცემა როტორს. ამ სიმძლავრის ნაწილი იხარჯება როტორში დანაკარგებზე, დანარჩენი ნაწილი კი გარდაიქმნება მექანიკურ სიმძლავრედ ლილვზე.

ენერჯიის შენახვის კანონიდან გამომდინარეობს, რომ P_{12} სიმძლავრე უნდა უდრიდეს ეკვივალენტური უძრავი როტორის აქტიურ სიმძლავრეს, ე. ი. ნახ. 390-ის თანახმად.

$$P_{12} = m_1 E_1 I_2^1 \cos \psi_2^1 = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2. \quad (28,11)$$

გარდაეკმნათ ეს გამოსახულება. ნაწ. III § 22-ის თანახმად,

$$E_1 = 4,44 f_1 k_1 \omega_1 \Phi \quad (28,12)$$

და ნაწ. IV, § 28-ის თანახმად

$$E_2 = 4,44 f_1 K_2 \omega_2 \Phi, \quad (28,13)$$

ამიტომ

$$\frac{E_1}{E_2} = -\frac{k_1 \omega_1}{k_2 \omega_2} = k_{12}. \quad (28,14)$$

ამ შეფარდებას ე. მ. დ.-ების ტრანსფორმაციის კოეფიციენტს უწოდებენ (28,9), (28,11) და (28,14)-იდან მივიღებთ

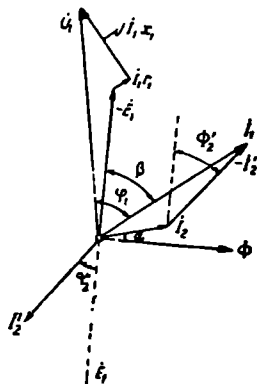
$$\cos \psi_3' = \cos \psi_2$$

და

$$\psi_3' = \psi_2 \quad (28,15)$$

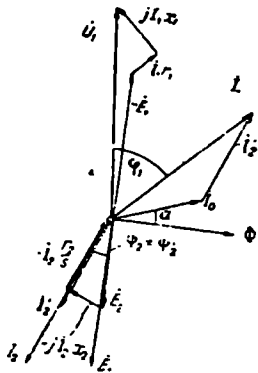
ეს ტოლობა საშუალებას გვაძლევს უშუალოდ გავაერთიანოთ სტატორის (ნახ. 391) და ეკვივალენტური უძრავი როტორის ვექტორული დიაგრამები, როგორც ეს შესრულებულია ნახ. 392-ზე. გაერთიანებული ვექტორული დიაგრამის აგება არ წარმოადგენს სიძნელეს, ვინაიდან I_2 (I_2^1) და I_1 დენების ვექტორების ურთიერთ ორიენტირება განისაზღვრება კუთხით

$$\psi_2' = \psi_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2}.$$



ნახ. 391.

ამგვარად დავამტკიცეთ მბრუნავ ასინქრონულ მანქანაში მიმდინარე პროცესების დაყვანის შესაძლებლობა, სტატორის და უძრავი როტორის სახის რაღაც ეკვივალენტურ ტრანსფორმატორის პროცესებამდე. ასეთი დაყვანა, როგორც ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, ძალზე ამარტივებს ასინქრონული მანქანის მუშაობის ანალიზს. ეს შესაძლებელია იმის გამო, რომ მბრუნავი როტორის დამამაგნიტებელი ძალა ყოველთვის უძრავია სტატორის დამამაგნიტებელი ძალის მიმართ და, მაშასადამე უძრავი როტორის დამამაგნიტებელი ძალის ეკვივალენტურია, როდესაც როტორის გრაგნილში მოქმედებს f_1 სიხშირის დენი. დაყვანილი უძრავი როტორის გრაგნილის ღერძი, ყოველთვის ემთხვევა სტატორის გრაგნილის შესაბამისი ფაზის ღერძს, ხოლო ძვრის კუთხე სტატორის i_1 და ეკვივალენტური უძრავი როტორის i_2 დენს შორის, დამოკიდებულია მხოლოდ I_0 დენზე, როტორის წრედის წინააღმდეგობაზე და ძრავის მექანიკურ დატვირთვაზე (სრიალი 5).



ნახ. 392. სტატორის და ეკვივალენტური უძრავი როტორის შედგენილი ფიქტორული დიაგრამა.

ვ) ასინქრონული მანქანის მეორადი

წრედის დაყვანა პირველადი წრედის პარამეტრებთან. 1. ძრავი ფაზური როტორით. ასინქრონული მანქანის მუშაობის გამოკვლევის დროს ხშირად მოსახერხებელია ვისარგებლოთ როტორის წრედის არა ნამდვილი, არამედ სტატორის წრედზე მიყვანილი პარამეტრებით. თუ ტრანსფორმატორში ასეთი მიყვანა ხდება მეორადი სიდიდეების უბრალო გამრავლებით ტრანსფორმაციის K_{12} , K_{21} კოეფიციენტებზე ან მათ კვადრატებზე, ასინქრონულ მანქანაში ეს მიყვანა რამდენიმედ გართულებულია გრაგნილების საპაერო შუალედის გასწვრივ სივრცული განაწილების გამო.

ზემოთ ნაჩვენები იყო (28,3), რომ მიყვანილი i_2 დენი დაკავშირებულია რეალურ I_2 დენთან შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$i_2 = I_2 \frac{m_2 \omega_2 k_{210}}{m_1 \omega_1 k_{10}} = I_2 k_{210}$$

მიყვანილი E_2^1 ე. მ. დ. ყოველთვის ტოლი უნდა იყოს E_1 ე. მ. დ.-ისა, ამიტომ (28,14)-ის თანახმად:

$$E_2^1 = E_2 \frac{k_{10} \omega_1}{k_{20} \omega_2} = E_2 k_{120}$$

ტრანსფორმატორისაგან განსხვავებით K_{12} , ზოგად შემთხვევაში არ

უდრის K_{12} და მხოლოდ, როდესაც $m_1 = m_2$, გვაქვს $K_{12} = K_{12}$. მიყვანილი აქტიური წინააღმდეგობის მნიშვნელობა განისაზღვრება ტოლობიდან

$$m_2 l_2^2 r_2 = m_1 l_1^2 r_2^1,$$

საიდანაც

$$\begin{aligned} r_2^1 &= r_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^2 = r_2 \frac{m^2}{m_1} \left(\frac{m_1 \omega_1 k_{1\nu}}{m_2 \omega_2 k_{2\nu}} \right)^2 = r_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{\omega_1 k_{1\nu}}{\omega_2 k_{2\nu}} \right)^2 = \\ &= r_2 \frac{m_1}{m_2} k_{12}^2. \end{aligned} \quad (28,16)$$

პირობიდან $\frac{x_2'}{r_2'} = \frac{x_2}{r_2}$ მივიღებთ:

$$x_2' = x_2 \frac{m_1}{m_2} k_{12}^2 \quad (28,17)$$

2. ძრავი ციყვის ბორბლით. დაუშვათ ციყვის ბორბლის ღეროთა რიცხვია N_2 . ასეთი გრაგნილის წყვილ პოლუსთა რიცხვი ყოველთვის უდრის მბრუნავი მაგნიტური არეს წყვილ პოლუსთა რიცხვს.

ციყვის ბორბლის ყოველი ღერო წარმოადგენს გრაგნილის ფაზას, ამიტომ ასეთი გრაგნილის ერთი ფაზის ხვევთა რიცხვი პირობით უნდა მივიღოთ ტოლი $\omega_2 = \frac{1}{2}$, m_2 კი, რომელიც წინათ

ფაზათა რიცხვს აღნიშნავდა, ამ შემთხვევაში წარმოადგენს ერთ წყვილ პოლუსზე მოსულ ღეროთა რიცხვს, ე. ი. $m_2 = N_2 : p$.

გრაგნილის მეზობელ ღეროებში აღძრული E_2 ე. მ. ძ. ბი ერთიმეორისაგან დაძრულია კუთხით $\alpha = \frac{2\pi}{N_2} = \frac{2\pi p}{N_2}$.

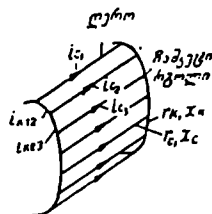
ვიპოვოთ დამოკიდებულება ღეროს I_c დენსა და ჩამკეტი რგოლის I_r დენს შორის. ნახ. 393-ის სქემიდან გამომდინარეობს, რომ დროის ნებისმიერი მომენტისათვის

$$i_{c2} = i_{r12} - i_{r23}.$$

ნახ. 394-ზე მოყვანილია ღეროების დენების ვექტორული დიაგრამა, რომელიც წარმოადგენს ერთმანეთის მიმართ $\alpha = \frac{2\pi p}{N_2}$ კუთხით დაძრულ ვექტორების ვარსკვლავს. დენები, ჩამკეტი რგოლების შესაბამის ღეროებს შორის მდებარე ნაწილებში, ერთი მეორის მიმართ ფაზით დაძრული იქნება იგივე α კუთხით (ნახ. 395).

ნახ. 395-დან გამომდინარეობს, რომ

$$I_k = \frac{I_c}{2 \sin \frac{\pi p}{N_2}} = \frac{I_c}{2 \sin \frac{\pi}{m_2}} \quad (28,18)$$



ნახ. 393. ციყვიშ ბორბლის ღეროებსა და რგოლებში დენის განაწილება.

ანალიზის გამარტივების მიზნით, ციყვის ბორბალი შევცვალოთ ვარსკვლავად შეერთებული ეკვივალენტური m_2 ფაზა გრაფილით, (ნახ. 396) გამოვალთ რა ორივე გრაფილში დანაკარგების ტოლობიდან, ვიპოვოთ ასეთი ვარსკვლავის ერთი ფაზის აქტიური წინააღმდეგობა r_{2a} .

თუ ერთი ღეროს წინააღმდეგობაა r_0 , ხოლო ორ ღეროს შორის მოთავსებული ჩამკეტი რგოლის ნაწილის წინააღმდეგობის r_k , მაშინ დანაკარგების განტოლებას ექნება სახე:

$$N_2 I_c^2 r_c + 2N_2 I_k^2 r_k = N_2 I_c^2 r_{2a},$$

საიდანაც (28,18)-ის საფუძველზე დავწერთ:

$$r_{2a} = r_c + \frac{2r_k}{\left(2 \sin \frac{\pi}{m}\right)^2}. \quad (28,19)$$

რეაქტიული სიმძლავრეების ტოლობიდან

$$N_2 I_c^2 x_c + 2N_2 I_k^2 x_k = N_2 I_c^2 x_{2a},$$

შეიძლება ვიპოვოთ ეკვივალენტური ვარსკვლავის რეაქტიული წინააღმდეგობა

$$x_{2a} = x_c + \frac{2x_k}{\left(2 \sin \frac{\pi}{m_2}\right)^2}, \quad (28,20)$$

სადაც x_c და x_k -ღეროს და რგოლის სათანადო ნაწილის ინდუქტიური წინააღმდეგობაა (ნახ. 393).

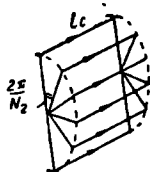
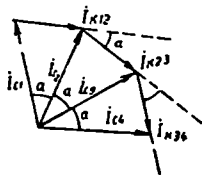
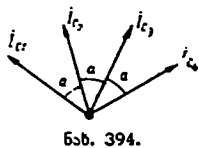
პრაქტიკული გამოთვლების დროს α კუთხის სიმციროს გამო უშვებენ, რომ

$$\sin \frac{\pi}{m_2} = \sin \frac{\pi p}{N_2} \approx \frac{\pi p}{N_2}.$$

ციყვის ბორბლის გრაფილის კოეფიციენტი $K_{2a} = 1$, ამიტომ, ვიღებთ რა მხედველობაში, რომ $\omega_2 = \frac{1}{2}$ და მოცემულ შემთხვევაში $m_2 = N_2$, ეპოულობთ ციყვის ბორბლის წინააღმდეგობის პირველად წრედთან მიყვანის კოეფიციენტს:

$$\frac{m_1}{m_2} \left(\frac{\omega_1 k_{1r}}{\omega_2 k_{2r}} \right)^2 = \frac{4m_1(\omega_1 k_{1r})^2}{N_2} = k. \quad (28,21)$$

მაშასადამე: $r_2' = k r_{2a}$ და $x_2' = k x_{2a}$.



ნახ. 396. ციყვის ბორბლის ეკვივალენტური m_2 ფაზა გრაფილი ვარსკვლავად შეერთებით.

როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები, ასინქრონული მანქანის სტატორსა და როტორში მავნიტური არე შექმნილია სტატორისა და როტორის დენების ერთობლივი დამამავნიტებელი მოქმედებით. მხოლოდ კერძო შემთხვევებში, სინქრონიზმის დროს ($S=0$), და როტორის გათიშული გრაგნილის შემთხვევაში, როდესაც როტორში დენი არ არსებობს, მავნიტური არე შექმნილია მხოლოდ სტატორის გრაგნილის დენით.

განვიხილოთ უფრო დაწვრილებით სტატორსა და როტორში მავნიტური ნაკადის განაწილების ხასიათი, რათა დავესაბუთოთ გრაგნილებთან ნაკადშემზის ანგარიშის მეთოდი და განვსაზღვროთ გრაგნილებში აღძრული ე. მ. ძ.-ბი. ნახ. 397-ზე ნაჩვენებია სტატორისა და როტორის რეზულტიური არეს განაწილება დროის განსაზღვრული მომენტისათვის დატვირთული და უძრავი მანქანის შემთხვევებში. ამ არეს რთული ხასიათი და მისი განუწყვეტელი ცვლილება დროის მიხედვით არ გვაძლევს რეზულტიური არეს უშუალო ანალიზის საშუალებას. ჩვეულებრივად უგულებელყოფენ რა გაუდენთას ანალიზის გამარტივების მიზნით, მიმართავენ სუპერპოზიციის მეთოდს და, როგორც ტრანსფორმატორში, მიიყვანენ რა როტორის გრაგნილს სტატორის გრაგნილზე, არესა და ნაკადშემზებს ყოფენ სამ შეზღვევად:

1) ურთიერთ ინდუქციის ნაკადშემზები ψ , რომელიც საერთოა სტატორისა და როტორის გრაგნილებისათვის და, რომლებიც Θ რეზულტიური დამამავნიტებელი ძალის რეაქტიული მდგენელის პროპორციულია;

2) სტატორის გრაგნილის ფანტვის ნაკადშემზები Ψ_{s1} , რომლებიც გაპირობებულია სტატორის თვითინდუქციისა და მისი როტორთან ურთიერთ ინდუქციის ნაკადშემზების სხვაობით და პროპორციულია სტატორის გრაგნილის Θ_1 დამამავნიტებელი ძალის.

3) როტორის გრაგნილის ფანტვის ნაკადშემზები Ψ_{r2} , რომლებიც გაპირობებულია როტორის თვითინდუქციისა და მისი სტატორთან ურთიერთ ინდუქციის ნაკადშემზების სხვაობით და, პროპორციულია როტორის Θ_2 დამამავნიტებელი ძალის.

თუ განვიხილავთ Ψ , Ψ_{s1} , Ψ_{r2} ნაკადშემზებს, როგორც დროის მიხედვით სინუსოიდურად ცვლად სიდიდეებს, მაშინ ისინი შეიძლება დატანილ იქნეს როგორც დროული ვექტორები ასინქრონული მანქანის ვექტორულ დიაგრამაზე (ნახ. 398).

ასინქრონული მანქანის რეზულტიური არე დატვირთვის შემთხვევაში სტატორისა და როტორის გრაგნილებთან ქმნის ნაკადშემზებს, რომლებიც აათანადოდ ტოლია (ნახ. 398).

$$\psi'_1 = \Psi + \Psi_{s1} \quad (29,1)$$

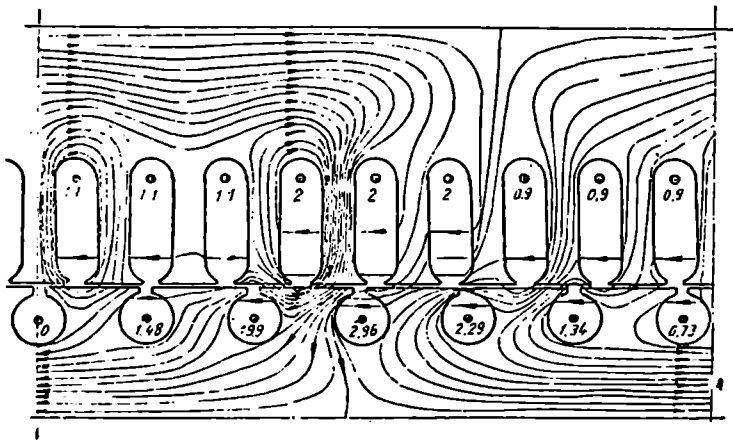
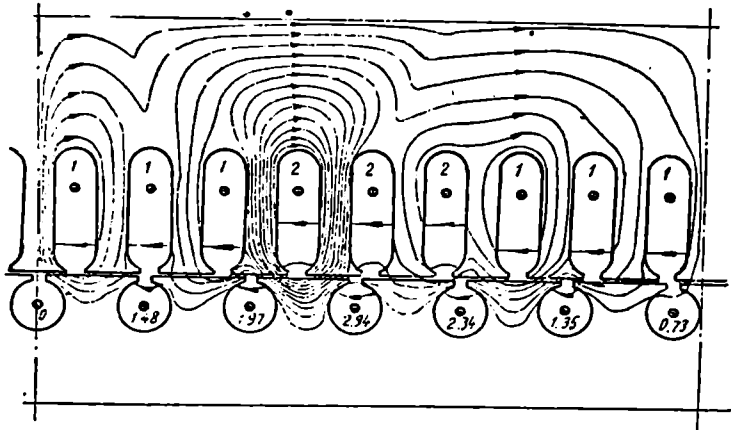
$$\Psi'_2 = \Psi + \Psi_{r2} \quad (29,2)$$

ზოგჯერ ასინქრონული მანქანის მუშაობის ანალიზის დროს Ψ ან-

კალმებმას განიხილავენ, როგორც Θ_1 და Θ_2 დამამაგნიტებელი ქალების მიერ ცალკე შექმნილ ორი ფიქტიური Ψ'_{11} და Ψ'_{21} ნაკალმებმის ჯამს, ისე რომ (ნახ. 398).

$$\Psi = \Psi'_{11} + \Psi'_{21}$$

(29,3)



ნახ. 397. მაგნიტური არეს ინდუქციური ძალაზების განაწილება უძრავ (ა) და დატვირთულ (ბ) ასინქრონულ ძრავში. ღრმულეებში დასმული ციფრები გვიჩვენებენ სრული დენების მყისა მნიშვნელობებს.

ასინქრონული მანქანის თეორიის ერთერთ შემქმნელთაგანის ა. ჰეილანდის (A Heyland) წინადადებით შეფარდებას

$$\tau_1 = \frac{\Psi_{\theta 1}}{\Psi'_{21}}$$

(29,4)

ეწოდება სტატორის ფანტვის კოეფიციენტი, და შეფარდებას

$$\tau_2 = \frac{V_{s2}}{V_{12}} \quad (29,5)$$

სათანადოდ როტორის ფანტვის კოეფიციენტი.

დ. ჰოპკინსონის (L. Hopkinson) წინადადებით სტატორისა და როტორის ფანტვა ხასიათდება შესაბამისი შეფარდებებით:

$$\sigma_1 = \frac{V_{21} + V_{s1}}{V_{11}} = 1 + \tau_1 \quad (29,6)$$

და

$$\sigma_2 = \frac{V_{12} + V_{s2}}{V_{12}} = 1 + \tau_2 \quad (29,7)$$

მანქანის საერთო ფანტვა კი ამ სიდიდეების ნამრავლით.

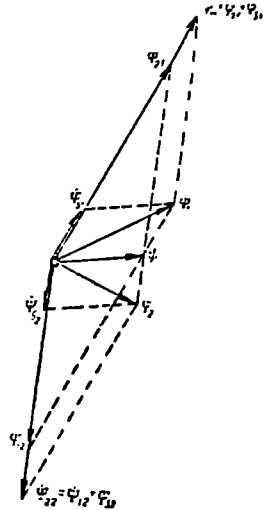
$$\sigma = \sigma_1 \cdot \sigma_2 = (1 + \tau_1)(1 + \tau_2) = 1 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 = 1 + \tau. \quad (29,8)$$

სიდიდე

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 \quad (30,9)$$

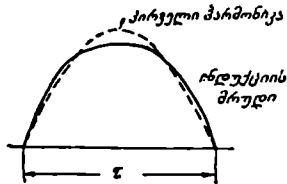
ასინქრონული მანქანის საერთო ფანტვის დასახასიათებლად შემოთავაზებული იყო ჰელიანდის შიერ და ამიტომ მას ჰელიანდის ფანტვის საერთო კოეფიციენტი ეწოდება. ასინქრონული მანქანის თანამედროვე თეორიაში სტატორისა და როტორის ფანტვას ჩვეულებრივად ახასიათებენ შეფარდებებით:

$$\frac{V_{s1}}{V'} \quad \text{და} \quad \frac{V_{s2}}{V'}$$



ნახ. 398. ასინქრონული ძრავის ნაკადშებმების ვექტორული დიაგრამა.

ნაკადშებმა V' განისაზღვრება მაგნიტური წრედის ანგარიშიდან. ფანტვის ნაკადშებმები V_{s1} და V_{s2} და მათ მიერ გაპირობებული სტატორის x_1 და როტორის x_2 ინდუქტიური წინააღმდეგობები განისაზღვრება მბრუნავი მანქანის ფანტვის არეების ანგარიშის საერთო მეთოდით.



ნახ. 399. ინდუქციის განაწილების ასინქრონული მანქანის საპირობო ღრეოში.

უნდა შეენიშნოს, რომ ასინქრონული მანქანის საპირობო ღრეოში ინდუქციის განაწილება დამამაგნიტებელი ძალის სინუსოიდური განაწილების შემთხვევაშიც კი არასინუსოიდურია (ნახ. 399), უმთავრესად საკბილო ფენის გაყენთვის გამო იქ სადაც გვაქვს დამამაგნიტებელი ძალის მრუდის მაქსიმუმი.

ამ მიზეზის გამო საჭიროა ღრეჩოს ინდუქციის მრუდში ადგილი აქვს ნესამე ჰარმონიკას.

ინდუქციის მრუდის არასინუსოიდობის მხედველობაში მიღება გვიხდება ასინქრონული მანქანის მაგნიტური მახასიათებლის $I_0 = f(E_1)$ აგების დროს და დანაკარგების გამოთვლისას.

ასინქრონული მანქანის მუშაობის ანალიზის დროს ზოგჯერ მოსახერხებელია შემოვიდოთ სტატორის ან როტორის ერთი ფაზის ინდუქტიობის L_{11} , L_{22} და M_{12} , M_{21} ურთიერთ ინდუქციის კოეფიციენტების ცნება, რომლებიც გაპირობებულია მბრუნავი არეთი, ე. ი. მოცემული გრაგნილის ყველა ფაზების დამამაგნიტებელი ძალების ერთდროული მოქმედებით¹. ასეთ დროს შესაძლებელია დაიწეროს შემდეგი ტოლობები:

$$L_{11} = \Psi_{11} : I_1 m \quad (29,10)$$

$$L_{22} = \Psi_{22} : I_2 m \quad (29,11)$$

$$M_{12} = \Psi_{12} : I_2 m \quad (29,12)$$

$$M_{21} = \Psi_{21} : I_1 m \quad (29,13)$$

ამ ტოლობებში Ψ_{11} წარმოადგენს სტატორის გრაგნილის ყველა ფაზებით შექმნილი მბრუნავი არეს ნაკადუმებმას სტატორის ერთ ფაზასთან, დროის იმ მომენტისათვის, როდესაც ამ ფაზის დენი $I_1 m$ მაქსიმალური მნიშვნელობისაა, Ψ_{12} წარმოადგენს ეკვივალენტური უძრავი როტორის გრაგნილის ყველა ფაზებით შექმნილი მბრუნავი არეს ნაკადუმებმას სტატორის ერთ ფაზასთან დროის იმ მომენტისათვის, როდესაც როტორის შესაბამის ფაზაში დენს აქვს $I_2 m$ მაქსიმალური მნიშვნელობა; Ψ_{22} და Ψ_{21} —იგივე ნაკადუმებმება ეკვივალენტური უძრავი როტორის ერთი ფაზისათვის.

თუ დანაკარგებს ფოლადში უგულვებელყოფთ და მივიღებთ, რომ $M_{12} = M_{21}$, მაშინ (29,3), (29,12) და (29,13) გამოსახულებებიდან გვექნება:

$$\Psi = M_{12}(\dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m}) = M_{12} \dot{I}_{0m} \quad (29,14)$$

ფანტეის ნაკადუმებების ზემოთ მოცემული განსაზღვრის თანახმად ტრანსფორმატორის ანალოგიურად შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\Psi_{e1} = I_{1m}(L_{11} - M_{21}); \quad (29,15)$$

$$\Psi_{e2} = I_{2m}(L_{22} - M_{21}). \quad (29,16)$$

მიღებულ (29,14)—(29,16) ტოლობები გვიჩვენებს, რომ მანქანის ინდუქტიობებს L_{11} , L_{22} და $M_{12} = M_{21}$ შეუძლიათ მოგვცეს მანქანის მაგნიტური არეს დახასიათება იმავე სიზუსტით, რა სიზუსტითაც არეს ახასიათებს ნაკადუმებები Ψ , Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_{e1} და Ψ_{e2} .

¹ იგულისხმება, რომ სტატორისა და როტორის დენების სისტემები სიმეტრიულია და როტორის გრაგნილი მიყვანილია სტატორის გრაგნილზე.

30. ასინქრონული მანქანის მუშაობის გენერატორული და
სამუხარუბო რეჟიმები

ასინქრონული მანქანის ძრავულ რეჟიმში მუშაობის დროს როტორი არჩეულ ყოველთვის უფრო ნელა ბრუნავს ($\omega_2 < \omega_1$), ისე, რომ სრიალი $1 > S > 0$. თუ ასინქრონული მანქანის როტორს დაგებრუნებთ გარეშე ძრავით, მბრუნავი არეს ბრუნვის მიმართულებით კუთხური სიჩქარით $\omega_2 > \omega_1$, მაშინ მანქანა გადავა გენერატორულ რეჟიმში და ქსელს მიაწოდებს აქტიურ სიმძლავრეს.

განვიხილოთ ეს რეჟიმი უფრო დაწვრილებით.

ასინქრონული გენერატორის როტორის წრედში, თუ მას განვიხილავთ სტატორის წრედისაგან დამოუკიდებლად, ადგილი ექნება იმავე პროცესებს, რასაც ასინქრონული ძრავის როტორის წრედში. დენი I_2 ჩამორჩება E_2 , ე. მ. დ.-გან Ψ_2 , ამასთან

$$\text{tg}\psi_2 = \frac{sX_2}{r_2} \quad (30,1)$$

გენერატორის როტორის ვექტორული დიაგრამა ანალოგიურია ძრავის როტორის წრედის დიაგრამის. (ნახ. 389) ამისაგან განსხვავებით ასინქრონული გენერატორის სტატორისა და როტორის წრედების შეთავსებული ვექტორული დიაგრამა, რომელიც ახასიათებს მანქანის მთლიან მუშაობას, პრინციპულად განსხვავებულია ძრავის დიაგრამისაგან. ეს განსხვავება აიხსნება იმით, რომ ძრავში მბრუნავი არეს მიერ სტატორისა და როტორის გამტარების გადაკვეთა ხდება ერთნაირი მიმართულებით (ნახ. 400) და ამიტომ შეთავსებულ ვექტორულ დიაგრამაზე E_1 და E_2 ე. მ. დ.-ბი ფაზით ერთმანეთს ემთხვევა. გენერატორში ადგილი აქვს საწინააღმდეგო მოვლენას: მბრუნავი არე სტატორისა და როტორის გრაგნილების გამტარებს გადაკვეთს საწინააღმდეგო მიმართულებით და ამიტომ შეთავსებულ ვექტორულ დიაგრამაზე E_1 და E_2 ე. მ. დ.-ბი პირობით ფაზით საწინააღმდეგოდაა გადადებული (ნახ. 401). ამავე მიზეზის გამო როტორის ფანტეის ე. მ. დ. თავის ფაზას იცვლის საწინააღმდეგოდ და ვექტორულ დიაგრამაზე ის ($jI_2 X_2$) წინ

უსწრებს დენის I_2 ვექტორს $\frac{\pi}{2}$ კუთხით. ამგვარად, ასინქრონული გენერატორის სტატორის წრედზე ეკვივალენტური უძრავი როტორის გავლენის სწორად აღრიცხვისათვის აუცილებელია დაუშვათ, რომ შეთავსებულ ვექტორულ დიაგრამაზე როტორის წრედში I_2 დენი წინ უსწრებს E_2 ე. მ. დ.-ს ψ_2 კუთხით. ეს აგრეთვე სხვა მოსაზრებიდანაც გამომდინარეობს:

$$\text{გენერატორულ რეჟიმში } \omega_2 > \omega_1, \text{ ამიტომ სრიალი } S = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} \text{ უარ-}$$

$$\text{ყოფითი მნიშვნელობისაა და } \text{tg}\psi_2 = \text{tg}\psi_2 = \frac{-sX_2}{r_2}.$$

ამგვარად, კუთხე $\psi_2 < 0$ და იმ მიმართულების საწინააღმდეგოდ გადაიძვრება, რომელიც მიღებული იყო ძრავულ რეჟიმისათვის. მის შემდეგ, რაც

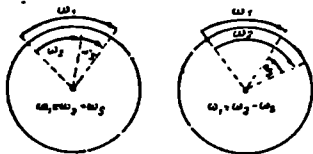
შეთავსებულ ვექტორულ დიაგრამაზე ნაპოვნია I_1 ვექტორის მიმართულება, სტატორის I_1 დენს განსაზღვრავენ მაგნიტური წონასწორობის პირობიდან,

$$I_1 = I_0 - I_1' \quad (30,2)$$

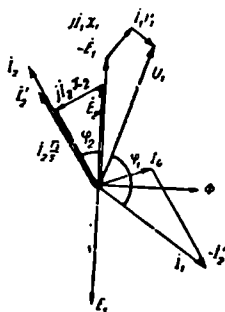
და ძაბვა U_1 ტოლობიდან

$$U_1 = -E_1 + I_1' Z_1 \quad (30,3)$$

როგორც ვექტორული დიაგრამიდან ჩანს (ნახ. 401), გენერატორულ რეჟიმში $\varphi_1 > \frac{\pi}{2}$ და, მაშასადამე $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 < 0$. ეს იმას გვიჩვენებს, რომ სიმძლავრე P_1 კი არ შთაინთქმება, არამედ გადაეცემა ქსელს.



ნახ. 400. კუთხური სიჩქარეების დიაგრამა ძრავულ და გენერატორულ რეჟიმებისათვის. ω_1 — არეს ბრუნვის კუთხური სიჩქარეა სტატორის გრაგნილის მიმართ; ω_2 — როტორის ბრუნვის კუთხური სიჩქარეა. ω_3 — არეს ბრუნვის სიჩქარეა როტორის გრაგნილის მიმართ.

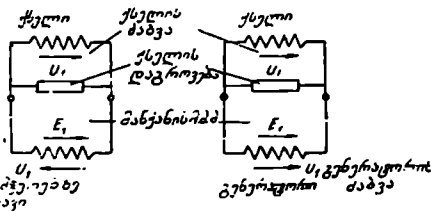


ნახ. 401.

თუ U_1 -ის ქვეშ ვიგულისხმებთ არა ქსელის ძაბვას (ნახ. 402), რომელიც მოდებულია მანქანის მომჭერებზე, არამედ ქსელის სხვა გენერატორებთან საერთო დატვირთვაზე პარალელურად მომუშავე გენერატორის ძაბვას, მაშინ U_1 ძაბვის ვექტორის მობრუნება მოგვიხდება 180° (ნახ. 403).

ასინქრონული გენერატორის გამაოყენებასთან დაკავშირებული პრაქტიკული საკითხები განხილული იქნება ქვემოთ.

ძრავული და გენერატორული რეჟიმების გარდა ასინქრონული მანქანას შეუძლია აგრეთვე სამუხრუტო რეჟიმში მუშაობა. დავეუშვათ, რომ საკიროა ასინქრონული ძრავის, რომელიც აბრუნებს დიდ ინერციის მომენტის მქონე რაიმე მექანიზმს, სწრაფი გაჩერება.



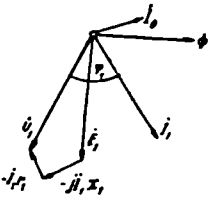
ნახ. 402. ე. მ. ძ.-ბისა და ძაბვების მიმართულების განსაზღვრა მანქანის ძრავულ და გენერატორულ რეჟიმში მუშაობის დროს.

ნახ. 402. ე. მ. ძ.-ბისა და ძაბვების მიმართულების განსაზღვრა მანქანის ძრავულ და გენერატორულ რეჟიმში მუშაობის დროს.

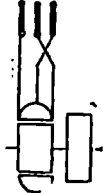
¹ დამამგნიტებელი ძალების სივრცული დიაგრამა გენერატორული რეჟიმისათვის იგება ნახ. 387-ს ანალოგიურად.

თუ ამ მიზნით ძრავს უბრალოდ ქსელიდან გამოვრთავთ, მაშინ მბრუნავ მექანიზმთან შეერთებული მისი როტორის დამუხრუჭება გასტანს დიდხანს, ვიდრე არ დაიხარჯება დაგროვილი ცოცხალი ძალა.

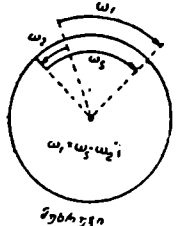
გამორბენის დროის შემცირების მიზნით შესაძლებელია სტატორი დაეტოვოს ქსელთან მიერთებული, მხოლოდ შეეცვალოს მისი ორი ფაზის მიერთების მიმდევრობა (ნახ. 404).



ნახ. 403. ასინქრონული გენერატორის ვექტორული დიაგრამა.



ნახ. 404. გამორბენის დროის შესამცირებლად არეს ბრუნვის მიმართულების შეცვლა.



ნახ. 405. კუბურ სიჩქარეების დიაგრამა სამუხრუჭო რეჟიმისათვის.

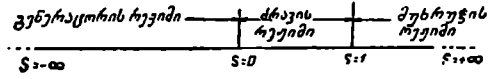
ამ შემთხვევაში არე შეიცვლის თავისი მოძრაობის მიმართულებას და დაიწყებს ბრუნვას როტორის გამორბენის საწინააღმდეგო მიმართულებით (ნახ. 405). ასეთ დროს სრიალი

$$S = \frac{\omega_1 - (-\omega_2)}{\omega_1} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1}$$

ერთზე მეტია.

რეზულტიურ მბრუნავ არესა და როტორის დენის ურთიერთ მოქმედების შედეგად აღძრული ელექტრომაგნიტური მომენტი, ისევე, როგორც ძრავში, მიმართული იქნება მბრუნავი არეს მიმართულებით და, ეწინააღმდეგება რა ინერციის ძალების მომენტს, ადგილი ექნება როტორის უფრო სწრაფად დამუხრუჭებას.

მანქანის მუშაობის ასეთ რეჟიმს სამუხრუჭო რეჟიმს უწოდებენ. იმის გამო, რომ ამ შემთხვევაში მბრუნავი არე სტატორისა და როტორის გრაგნილების გამტარებს ერთი და იგივე მიმართულებით ჰქვითს, ამიტომ სამუხრუჭო რეჟიმის ვექტორულ დიაგრამასა და ძრავის ვექტორულ დიაგრამებს შორის პრინციპული განსხვავება არ არსებობს.



ნახ 406.

ნახ. 406-ზე მოყვანილია სრიალის შკალა გენერატორული, ძრავული და სამუხრუჭო რეჟიმებისათვის. სამუხრუჭო რეჟიმის პრაქტიკული გამოყენების შესახებ უფრო დაწვრილებით ნათქვამი იქნება ქვემოთ.

31. ასინქრონული მანქანის მუშაობის გამოკვლევების
ანალიზური ხეობი

სტატორისა და როტორის წრედების ვექტორული დიაგრამების საფუძველზე ასინქრონული მანქანისათვის შესაძლებელია დაიწეროს შემდეგი ვექტორული განტოლებები:

$$\dot{U}_1 = I_1 r_1 + j I_1 x_1 - \dot{E}_1 \quad (31,1)$$

$$\dot{E}'_2 = I'_2 \frac{r'_2}{s} + j I'_2 x'_2 \quad (31,2)$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = I_0 \quad (31,3)$$

თუ დავუშვებთ ისე, როგორც ტრანსფორმატორის შემთხვევაში,

$$-\dot{E}_1 = -\dot{E}'_2 = I_0 Z_{12} \quad (31,4)$$

(31,1) და (31,2)-ის ნაცვლად მივიღებთ

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_0 Z_{12} \quad (31,5)$$

$$0 = \dot{I}_2 Z'_2 + \dot{I}_0 Z_{12} \quad (31,6)$$

სადაც $Z_1 = r_1 + jx_1$ და $Z'_2 = \frac{r'_2}{s} + jx'_2$.

როდესაც $s=1$, გვაქვს $Z'_2 = Z_2 = r_2 + jx'_2$.

(31,3) ÷ (31,6) განტოლებების ერთობლივი ამოხსნით მოენახათ

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{Z_{12} + Z'_2}{Z_1 Z_{12} + Z'_2 Z_{12} + Z_1 Z'_2} \quad (31,7)$$

და

$$-\dot{I}'_2 = \dot{U}_1 \frac{Z_{12}}{Z_1 Z_{12} + Z'_2 Z_{12} + Z_1 Z'_2} \quad (31,8)$$

თუ მიღებული განტოლებების მრიცხველსა და მნიშვნელს გაყოფთ

$Z_{12} = \frac{1}{Y_{12}}$ -ზე და შემოვიღებთ კოეფიციენტს

$$C_1 = \frac{Z_{12} + Z_1}{Z_{12}} = 1 + Z_1 Y_{12} = 1 + j^2 \frac{1}{s} \quad (31,9)$$

მივიღებთ:

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{1 + Z_1^2 S}{Z_1 + C_1 Z'_2} \quad (31,10)$$

$$-\dot{I}'_2 = \dot{U}_1 \frac{1}{Z_1 + C_1 Z'_2} \quad (31,11)$$

(31,3), (31,4), (31,10) და (31,11) ტოლობებიდან მოენახათ

$$\dot{E}_1 = -\dot{U}_1 \frac{Z'_2}{Z_1 + C_1 Z'_2} \quad (31,12)$$

კოეფიციენტი C_1 ტოლია U_1 ძაბვისა და სტატორის გრაგნილის E_{s0} ე. მ. ძ.-ის (შებრუნებული ნიშნით) შეფარდებისა ასინქრონული მანქანის სინქრონული სიჩქარით ბრუნვის დროს, მართლაც (31,12)-დან გვაქვს:

$$\frac{\dot{U}_1}{-E_1} = -\frac{Z_1}{Z_2'} + C_1. \quad (31,13)$$

სინქრონიზმის დროს $S=0$ და $Z_2'=\infty$, ამიტომ:

$$\frac{\dot{U}_1}{-E_{s0}} = C_1 = c_1 e I \gamma_1. \quad (31,14)$$

ჩვეულებრივად, γ_1 კუთხე მცირეა, უარყოფითი ნიშნისაა და არ აღემატება -1° , ისე, რომ დიდი სიზუსტით შეიძლება ჩავთვალოთ:

$$\frac{\dot{U}_1}{-E_{s0}} \approx \frac{U_1}{E_{s0}} = c_1, \quad (31,15)$$

რაც საგრძნობლად ამარტივებს მთელ ანგარიშს.

ანგარიშისათვის აგრეთვე მოსახერხებელია \dot{I}_1 და \dot{I}_2' დენების ფარდობის შემოღება დამუხრუჭებული როტორის შემთხვევაში ($S=1$).

ამ შემთხვევაში (31,10) და (31,11)-ის თანახმად

$$\left(\frac{-\dot{I}_1}{-\dot{I}_2'} \right)_{s=1} = 1 + \frac{Z_2'}{Z_1} = \frac{Z_{12} + Z_2'}{Z_{12}} = C_2 = c_2 \cdot e I \gamma_2. \quad (31,16)$$

ჩვეულებრივად ყველა პრაქტიკულ შემთხვევაში Z_2' მცირედ განსხვავდება Z_1 -ისაგან, ისე, რომ პრაქტიკული გამოთვლებისათვის საკმარისი სიზუსტით შეგვიძლია მივიღოთ $c_2 \approx c_1$, ამასთან $\gamma_2 \approx 0$.

გამოვიყვლიოთ E_1 , ე. მ. ძ.-ის ცვლილება α სრიალისაგან დამოკიდებულებით.

ამ მიზნით მოენახოთ $(-E:U_1) = \alpha$ შეფარდების მოდული. ზემოთ ნათქვამის თანახმად, მივიღოთ $\gamma_1=0$, მაშინ (31,12)-ის თანახმად

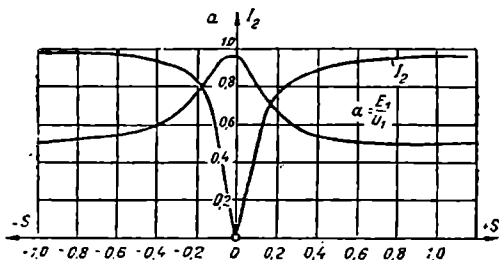
$$\alpha = \left| \frac{Z_{2s'}}{Z_1 + C_1 Z_{2s'}} \right| = \sqrt{\frac{\left(\frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_2'^2}{\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}. \quad (31,17)$$

ნახ. 407-ზე წარმოდგენილია ასინქრონული მანქანისათვის $\alpha = f(s)$ -ის ტიპური მრუდი. ამ მრუდიდან გამომდინარეობს, რომ $\alpha=0$ -ის შემთხვევაში ე. მ. ძ. E_1 , დაახლოებით ტოლია ძაბვის მანქანის მოშვებებზე $E_{s0} \approx U_1$. ძრავი რეჟიმის შუალედში სრიალის გაზრდით ფარდობა α (ე. მ. ძ. E_1) დასაწყისში მცირდება სწრაფად, ხოლო შემდეგ უფრო ნელა და მრუდი ასიმპტოტურად უახლოვდება განსაზღვრულ ზღვარს, რომელიც ახლოსაა 0,5.

გენერატორული რეჟიმის ფარგლებში ფარდობა α დასაწყისში რამდენიმედ იზრდება, ხოლო შემდეგ კლებულობს თითქმის იგივე კანონით, როგორც ეს გვექონდა სრიალის დადებითი მნიშვნელობისათვის.

ვინაიდან $E_1 \equiv \Phi$, ამიტომ ცხადია, რომ ასინქრონული მანქანის მუშაობის დროს მისი მაგნიტური ნაკადი იცვლება იგივე წესით, როგორც ფარდობა α . (31,11) დან გამომდინარეობს, რომ

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}} \quad (31,18)$$



ნახ. 407.

როდესაც $s=0$, დენი $I_2' = 0$; როდესაც $s=-1$ და $r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} = 0$, I_2' დენს აქვს მაქსიმალური მნიშვნელობა.

ნახ. 407-ზე ნახვებია დამოკიდებულება $I_2 = f(s)$ ამასთან I_2 გადაზომილია ორდინატთა ღერძზე, თავისი მაქსი-

მალური მნიშვნელობის ფარდობით ერთეულებში.

საკიროა აღვნიშნოთ, რომ კოეფიციენტები c_1 და c_2 პრაქტიკულად პოპკინსონის ფანტის კოეფიციენტების ტოლია:

$$c_1 \approx \sigma_1 = 1 + \tau_1; \quad c_2 \approx \sigma_2 = 1 + \tau_2,$$

სადაც τ_1 და τ_2 — ჰეილანდის ფანტის კოეფიციენტებია.

მართლაც (31,9) და (31,16) განტოლებების თანახმად

$$C_1 = 1 + \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \quad \text{და} \quad C_2 = 1 + \frac{Z_{21}'}{Z_{12}}$$

თუ აქტიურ წინააღმდეგობებს უგულებელვყოფთ, გვექნება:

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{\Psi_{s1}}{\Psi_{21}} = \sigma_1$$

და

$$c_2 \approx 1 + \frac{x_2'}{x_{12}} = 1 + \frac{\Psi_{s2}}{\Psi_{12}} = \sigma_2.$$

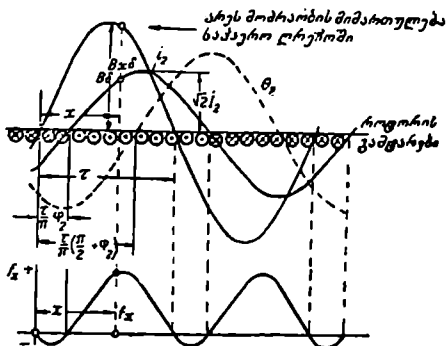
32. ასინქრონული მანქანის მუშაობის მახასიათებლები

ა) მუშაობის მომენტის განსაზღვრა ელექტრომაგნიტურ ძალთა კანონიდან. ორპოლუსა მანქანის სივრცული დიაგრამის განხილვის დროს (ნაწ. IV, § 28, ბ) დადგენილი იყო, რომ მუშაობის არეს B_z ინდუქციის მაქსიმუმი დაძ-

რულია θ_2 , დამამაგნიტებელი ძალის მაქსიმუმის მიმართ სივრცული კუთხით $\frac{\pi}{2} + \psi_2$. ψ_2 — კუთხის მნიშვნელობა განისაზღვრება ტოლობიდან

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{5x_2}{r_2}$$

მოვხებით ასინქრონული მანქანის მიერ განვითარებული მამრუნი მომენტის გამოსახულება ზემოთ ნათქვამის მხედველობაში მიღებით. ამასთან, გამოყვანის გამარტივების მიზნით დავუშვათ, რომ როტორზე მოთავსებულია განაწილებული გრავილი ციყვის ბორბლის სახით, N_2 გამტართა რიცხვით. ინდუქციისა და როტორის θ_2 დამამაგნიტებელი ძალის განაწილება საპარო ღრეჩოს გარშემოწერილობაზე ჩაეთვალოთ სინუსოიდურად ნახ. (408).



ნახ. 408. ინდუქციის როტორის გამტარებში დენისა და ელექტრომაგნიტურ ძალთა განაწილება ასინქრონული მანქანის საპარო ღრეჩოს გასწვრივ.

როტორის გამტარებში i_2 დენების მყისა მნიშვნელობის განაწილება ამავე დროს იქნება აგრეთვე სინუსოიდური.

დროის მოცემულ მომენტში ათვლის საწყისიდან x მანძილზე მდებარე გამტარზე მოქმედი ელექტრომაგნიტური ძალა ტოლი იქნება:

$$f_x = B_x i_2 l = B_2 \sin \frac{\pi}{\tau} x \sqrt{2} I_2 \sin \left(\frac{\pi}{\tau} x - \psi_2 \right) l,$$

სადა l — გამტარის სიგრძეა როტორის ღრეჩოვლი მიმართულებით, I_2 — ერთ გამტარში როტორის დენის ეფექტური მნიშვნელობაა.

როტორის წრეხაზის dx მანძილზე გამტართა რიცხვი ტოლია $\frac{N_2}{2p\tau} dx$ -ის, მათზე მოქმედი ძალა კი $df = f_x \frac{N_2}{2p\tau} dx$. df ძალა ჰქმნის

ბრუნვის მომენტს, რომელიც ტოლია $r df$, სადა r — როტორის რადიუსი $r = \frac{2pr}{2\pi}$

როტორის ყველა გამტარებით შექმნილი ბრუნვის მომენტი ტოლი იქნება:

$$\begin{aligned} M &= 2p \int_0^{\tau} r df = \frac{I_2 \sqrt{2} l N_2}{\tau} \cdot \frac{p\tau}{\pi} \int_0^{\tau} \sin \frac{\pi x}{\tau} \sin \left(\frac{\pi}{\tau} x - \psi_2 \right) dx = \\ &= \frac{B_2 \cdot l \cdot N_2 p \tau}{\sqrt{2} \pi} \cos \psi_2. \end{aligned} \quad (32, 1)$$

მანქანის საპერო ღრეოში მაგნიტური ნაკადი ტოლია

$$\Phi = B \cdot \tau \cdot l \cdot \frac{2}{\pi} \quad (32,2)$$

ნაკადის ამ მნიშვნელობის შეტანით (32,1)-ში მივიღებთ

$$M = \frac{I_2 \Phi N_2 p}{2\sqrt{2}} \cos \psi_2 J.$$

თუ Φ მაგნიტურ ნაკადს გამოვსახავთ მაქსველებში, M მომენტს კი $K G m$ -ში, მივიღებთ:

$$M = \frac{I_2 \Phi N_2 p}{9,81 \cdot 2\sqrt{2} \cdot 10^8} \cos \psi_2 \text{ kGm}. \quad (32,3)$$

როტორზე ფაზური გრაგნილის არსებობის შემთხვევაში, გრაგნილში დენების განაწილების თავისებურების აღრიცხვა ხდება (32,3) ტოლობის მარჯვენა ნაწილის მრიცხველში გრაგნილის კოეფიციენტის შეტანით: $k_w = k_p \cdot k_f$:

$$M = \frac{I_2 \Phi k_w N_2 p}{9,81 \cdot 2\sqrt{2} \cdot 10^8} \cos \psi_2 \text{ kGm}. \quad (32,4)$$

მანქანის დატვირთვის ცვლის დროს ერთდროულად იცვლება სამი სიდიდე: I_2 , Φ , $\cos \psi_2$, ამიტომ გამოსახულება (32,4) თუმცა გვაძლევს საშუალებას გვაკეთოთ ზოგიერთი ზოგადი დასკვნები, მაგრამ მამბრუნი მომენტის დაწვრილებითი ანალიზისათვის მაინც მოუხერხებელია.

უფრო მოსახერხებელია მამბრუნი მომენტის გამოსახულების სხვა ფორმა, რომელიც განხილული იქნება ქვემოთ.

ბ) ახსენებთ მანქანის მამბრუნი მომენტის განსაზღვრა მაგნიტური აჩუხ მიერ როტორზე გადაცემული სიმძლავრის საშუალებით. ნაწ. IV § 28-ის თანახმად ასინქრონული მანქანის მამბრუნი მომენტი ტოლია:

$$M = \frac{m_2 I_2^2 r_2}{\omega_1 s} = \frac{P_{12}}{\omega_1} \quad (32,5)$$

შემოვიტანთ რა როტორის წრედის დაყვანილ სიდიდეებს, მივიღებთ:

$$M = \frac{m_1 I_2^2 r_2'}{\omega_1 s} \quad (32,6)$$

ან, (31,18)-ის თანახმად

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{s \cdot \omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right) + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]} \quad (32,7)$$

მამბრუნი მომენტის მუდმივი გამოსახულება (32,7) მეტად მოსახერხებელია ასინქრონული მანქანის მუშაობის ანალიზისათვის, ვინაიდან ის, როდესაც $U_1 = \text{const}$, შეიცავს მხოლოდ ერთ ცვლად s სიდიდეს. (32,5)-დან გამომდინარეობს რომ $P_{12} = \omega_1 \cdot M \equiv M$, ამიტომ ხშირად M მომენტის ნაცვლად სარ-

გებლობენ მისი პროპორციული P_{12} სიმძლავრით. ამ შემთხვევაში P_{12} სიღრმეს ზოგჯერ უწოდებენ მომენტს სინქრონულ ვიტებში.

ფორმულა (32,7) საშუალებას გვაძლევს გავაყეთოთ ასინქრონული მანქანის თეორიისათვის მეტად მნიშვნელოვანი დასკვნა, იმის შესახებ, რომ მოცემული s სრიალის დროს ბრუნვის მომენტი მოღებული U_1 ძაბვის ევდრატის პროპორციულია.

გ) მებრუნ მომენტსა და ხრიალს შორის დამოკიდებულებების ანალიზი. დამოკიდებულება $M = f(s)$, რომელიც შეესაბამება (32,7) ტოლობას, მოცემულია მრუდის სახით ნახ. 409-ზე.

$M = f(s)$ მრუდს აქვს ორი ცხადად გამოსახული მაქსიმუმი: ერთი გენერატორულ რეჟიმში, მეორე ძრავულ (სამუხრუჭო) რეჟიმში.

გავუტოლოებთ რა $\frac{dM}{ds} = 0$,

ადვილად ვიპოვით სრიალის იმ s_m მნიშვნელობებს, რომლის დროსაც ასინქრონული მანქანა ავითარებს მაქსიმალურ მომენტს M_m :

$$s_m = \pm \frac{c_1 r_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}} \quad (32,8)$$

ხშირად ფესვებზე $(x_1 + c_1 x_2')$ -თან შედარებით, r_1^2 სიდიდეს უგულებელყოფენ, რაც მეტწილად პრაქტიკული მიზნებისათვის დასაშვებია. ამ შემთხვევაში s_m -ისათვის მივიღებთ:

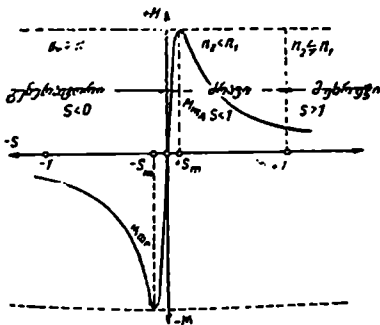
$$s_m \approx \pm \frac{c_1 r_2'}{x_1 + c_1 x_2'} \quad (32,9)$$

(32,8)-დან s_m -ის ჩასმით (32,7) გამოსახულებებში მივიღებთ მაქსიმალური M_m მომენტის გამოსახულებას:

$$M_m = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 c_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}]} \quad (32,10)$$

(32,8) (32,9) და (32,10) ტოლობებში ნიშანი (+) ეკუთვნის ძრავულ სამუხრუჭო რეჟიმს, ნიშანი (-) კი გენერატორულ რეჟიმს.

ვინაიდან r_1 აქტიური წინააღმდეგობა მცირეა $(x_1 + c_1 x_2')$ რეაქტიულ წინააღმდეგობასთან შედარებით, ამიტომ ადვილი შესაძენეია, რომ მაქსიმალური მებრუნის მომენტი დამოკიდებულია უმთავრესად სტატორისა და როტორის გრავილების რეაქტიულ წინააღმდეგობებისაგან, მცირდება რა მათი ვაზრდით.



ნახ. 409.

ასინქრონული მანქანის მიერ გენერატორულ რეჟიმში განვითარებულ მკსიმალური მომენტი M_{ms} მეტია, ვიდრე ძრავული რეჟიმის მკსიმალური მომენტი M_{mg} . ეს ადვილი დასამტკიცებელია, თუ ავიღებთ ფარდობას:

$$\frac{M_{ms}}{M_{mg}} = \frac{+r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}{-r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}} \quad (32,11)$$

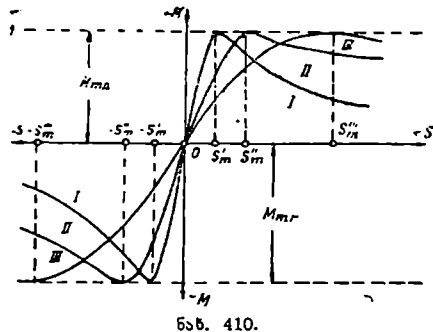
ამ შეფარდების მარჯვენა მხარეზე მრიცხველისა და მნიშვნელის $c_1 x_2'$ -ზე გაყოფით მივიღებთ:

$$\frac{M_{ms}}{M_{mg}} = \frac{c_1 \frac{r_2'}{r_1} + s_m}{c_1 \frac{r_2'}{r_1} - s_m} \quad (32,12)$$

(32,11) და (32,12) შეფარდებებიდან ცხადია, რომ $M_{ms} > M_{mg}$.

(32,10) განტოლების განხილვიდან გამომდინარეობს, რომ მკსიმალური მომენტი M_m არაა დამოკიდებული როტორის წრედის r_2 აქტიურ წინააღმდეგობაზე, მაგრამ (32,8)-ის თანახმად ეს წინააღმდეგობა გავლენას ახდენს s_m სრიალზე, რომლის დროსაც ასინქრონული მანქანა M_m მომენტს ავითარებს.

ნახ. 410-ზე მოყვანილია



ნახ. 410.

მაბრუნე მომენტების მრუდები როტორის წრედის აქტიური წინააღმდეგობის სამი მნიშვნელობისათვის, ისე, რომ $r_{2I} < r_{2II} < r_{2III}$ და მათი შესაბამისი სრიალები $s'_m < s''_m < s'''_m$.

როგორც ამ მრუდებიდან ჩანს, როტორის წრედის აქტიური წინააღმდეგობის გაზრდით $M = f(s)$ დამოკიდებულება გარეგნულად მკვეთრად იცვლება, მაგრამ M_{ms} და M_{mg} უცვლელი

რჩებიან. სტატორის წრედის r_1 აქტიური წინააღმდეგობის გაზრდა ამცირებს მკსიმალური მომენტის მნიშვნელობას ძრავულ რეჟიმში და ზრდის გენერატორული რეჟიმის შემთხვევაში.

როდესაც $s=0$, ასინქრონული მანქანის მაბრუნე მომენტი ნულის ტოლია, ვინაიდან ამ შემთხვევაში $I_2=0$. M_m მაბრუნე მომენტს, რომელსაც ასინქრონული მანქანა ავითარებს უძრავი როტორის შემთხვევაში ($s=1$), გააზრდის ან ბრუნვის საწყისი მომენტი ეწოდება. გამშვ მომენტს ხშირად ფარდობით ერთეულებში გამოსახავენ, ე. ი. I_{1H} , I_{2H} და ნომინალური დენების და ბრუნვის ნომინალური სიჩქარის შესაბამის s_H სრიალის დროს ძრავის მიერ განვითარებული M_H ნომინალური მომენტის ნაწილებში.

ნომინალური მომენტი

$$M_H = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{\omega_1 s_H} \quad (32,13)$$

და შესაბამისად გამშვი მომენტი

$$M_{II} = \frac{m_2 I_2^2 \omega^2 r^2}{\omega_1} \quad (32.14)$$

ამიტომ გამშვი მომენტი ფარდობით ერთეულებში ტოლია:

$$K_{II} = \frac{M_{II}}{M_{II}} = s_{II} \left(\frac{I_{2II}}{I_{2II}} \right)^2 \quad (32.15)$$

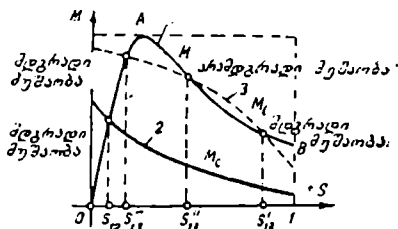
გამშვი მომენტის გაზრდისა და შემცირების შესაძლებლობა განხილული იქნება ქვემოთ.

$M = f(s)$ დამოკიდებულების ხასიათი არსებით გააღვანას ახდენს ასინქრონული მანქანის მუშაობის მდგრადობაზე, როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი სრიალის არეში.

მაგალითისათვის განვიხილოთ ძრავული რეჟიმის ზონა. ნახ. 411-ზე ნაჩვენებია მომენტების სამი მრუდი:

ძრავის მიერ განვითარებული მობრუნე მომენტის (მრუდი 1) და დატვირთვის წინააღმდეგობის M_c მომენტის s სრიალისაგან დამოკიდებულებების 2 და 3 მრუდები. ძრავის მუშაობის დამყარებული რეჟიმი გვექნება ისეთი s სრიალისათვის, რომ-

ლის დროსაც ძრავის მიერ განვითარებული მომენტი M აწონასწორებს დატვირთვის წინააღმდეგობის M_c მომენტს. მომენტის 1 და 2 მრუდებისათვის ეს წონასწორობა დამყარდება s_{12} სრიალის დროს მრუდების გადაკვეთის წერტილში. ამ s_{12} სრიალის დროს ძრავი ემუშავებს მდგრადად, რადგან სრიალის ყოველი შემთხვევითი მცირეოდენი გაზრდისას ($s > s_{12}$), მომენტების სხვაობა დადებითია. $M - M_c > 0$ და ხმარდება ძრავის სინქარის გაზრდას და სრიალის შემცირებას. ზის პირვეანდელ s_{12} მნიშვნელობამდე. პირუქუ, როდესაც $s < s_{12}$, $M - M_c < 0$ და ძრავი მუხრუქდება მანამ, ვიდრე სრიალი არ გაიზრდება პირვეანდელ s_{12} მნიშვნელობამდე.



ნახ. 411. ასინქრონული ძრავის მუშაობის მდგრადობა.

მდგრადობის კრიტერიუმს წარმოადგენს უტოლობა $\frac{dM}{ds} > \frac{dM_c}{ds}$.

უტოლობის დაცვის შემთხვევაში ძრავი მუშაობს მდგრადად. დატვირთვის წინააღმდეგობის მომენტის 3 მრუდით ცვლის შემთხვევაში s'_{13} სრიალის დროს ძრავის მუშაობა არამდგრადია. მართლაც, სრიალის მცირედ გაზრდის შემთხვევაში, გაჩნდება მომენტთა უარყოფითი სხვაობა $M - M_c$; რომელიც

იწვევს ძრავის სიჩქარის შემდგომ შემცირებას. ამ წერტილისათვის (s''_{13}) მდგრადობის კრიტერიუმში არ არის დატული:

$$\frac{dM}{ds} < \frac{dM_c}{ds},$$

ვინაიდან ორივე წარმოებულ უარყოფითია.

ანალოგიური მსჯელობით შეიძლება დავამტკიცოთ, რომ, თუ გვაქვს M_c მომენტი 3 მრუდის სახით, მაშინ s'_{12} და s'''_{13} სრიალის დროს ადგილი ექნება მუშაობის მდგრად რეჟიმებს, რადგან ორივე შემთხვევისათვის

$$\frac{dM}{ds} > \frac{dM_c}{ds}.$$

ნორმალურად ასინქრონული ძრავები გათვლილია მხოლოდ მცირე სრიალით ($3-4\%$) მუშაობისათვის, რაც შეესაბამება მომენტების 1 მრუდის OA უბნის საწყის ნაწილს (ნახ. 411). მომენტის მრუდის ვარდნილი AB ნაწილი ნორმალური მუშაობისათვის არ გამოიყენება, ვინაიდან ამ დროს სტატორისა და როტორის დენები ძალზე დიდი მნიშვნელობისაა.

თუ წინააღმდეგობის მომენტი მეტი იქნება, ვიდრე M_m , ძრავი გაჩერდება.

შეყარდება $-\frac{M_m}{M_H}$ ახასიათებს ძრავის გადატვირთვის უნარიანობას.

ჩვეულებრივად $-\frac{M_m}{M_H} = 2 \div 3$ და OCT 20020-ის თანახმად არ უნდა იყოს 1,6-ზე ნაკლები.

დ) კლოსის ფორმულა. მომენტის (32,7) ფორმულის პრაქტიკული მიზნებისათვის მოსახერხებელი მოდიფიკაცია მოცემული იყო მ. კლოსის მიერ (M. Kloss).

კლოსის თანახმად ხდება არა $M=f(s)$ დამოკიდებულების, არამედ

$\frac{M}{M_m} = \varphi(s)$ ფარდობის გამოკვლევა.

(32,7)-ში $s=s_m$ ჩასმით მივიღებთ

$$\frac{M}{M_m} = \frac{s_m \left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s_m} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}{s \left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} \quad (32,16)$$

(32,8) გამოახტლებიდან ვპოულობთ:

$$(x_1 + c_1 x_2')^2 = \left(\frac{c_1 r_2'}{s_m} \right)^2 - r_1^2. \quad (32,17)$$

(32,16) და (32,17) განტოლებების ერთობლივი გადაწყვეტა ვლებულათ:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2 + \beta s_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + \beta s_m} \quad (32,18)$$

სადაც

$$\beta = \frac{2r_3}{c_1 r_3'}$$

β და S_m -ის წინასწარ აღებული მნიშვნელობისათვის აღვიღად აიგება მრული $\frac{M}{M_m} = \varphi(s)$; ასეთი მრული ძრავულ რეჟიმისათვის ნაჩვენებია ნახ. 412-ზე.

როგორც ნახ. 412-დან ჩანს, $\frac{M}{M_m} = \varphi(s)$

მრუდის საწყის ნაწილში, სრიალის მცირე მნიშვნელობისათვის ბრუნვის მომენტი თითქმის სწორი ხაზის კანონით იცვლება.

მართლაც, თუ სრიალის მცირე მნიშვნელობისათვის (32,18) გამოსახულებაში უგულებელვყოფთ $\frac{s}{s_m}$ და βs_m წევრებს $\frac{s_m}{s}$ წევრ-

თან შედარებით, მივიღებთ:

$$\left(\frac{M}{M_m} \right)_{s \rightarrow 0} = \frac{2 + \beta s_m}{s_m} \cdot s, \quad (32,19)$$

ე. ი. სწორი ხაზის განტოლებას.

გამშვიდ მომენტისათვის ($s=1$) მიიღება:

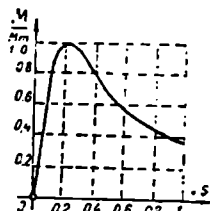
$$\frac{M_m}{M_m} = \frac{s_m(2 + \beta s_m)}{1 + s_m^2(1 + \beta)} \quad (32,20)$$

თუ (32,18) ფორმულის მრიცხველში და მნიშვნელში უგულებელვყოფთ βs_m წევრს, მისი შედარებითი სიმცირის გამო, მაშინ მივიღებთ:

$$\frac{M}{M_m} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (32,21)$$

ეს მიახლოებითი ტოლობა და აკრთევე (32,18) ტოლობა კლოსის ფორმულის სახელწოდებას ატარებს. იმ შემთხვევაში, როდესაც არ მოითხოვება დიუნა სიზუსტე განტოლება (32, 21). გამოთვლებისათვის ფრიად მოსახერხებელია.

ე) როტორში ჰისტერეზისით და ფუკს დენებით გაპარბებული მახრუნი მომენტი. ზემოთ განხილული იყო ასინქრონული მანქანის ბრუნვის



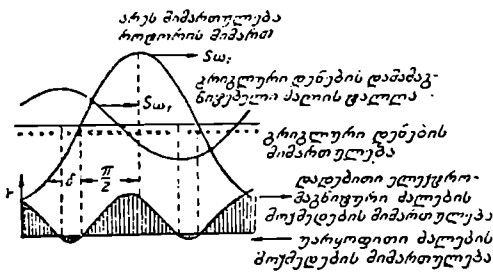
ფიგ. 412 ასინქრონული ძრავის მახრუნი მომენტის მრული

$\frac{M}{M_m} = \varphi(s)$ დამოკიდებულების სახით.

მომენტი, რომელიც გაპირობებულია მანქანის რეზულტიურ სინუსოიდურ მავნიტურ არეს და როტორის გამტარებში დენის ურთიერთქმედებით.

განვიხილოთ ჰისტერეზისის მოვლენის და როტორის ტანში გრიგალური დენების შედეგად როტორზე მოქმედი ბრუნვის დამატებითი მომენტი.

როგორც ნახ. 413-დან ჩანს, მავნიტური არეს პირველი ჰარმონიკი შობრაობს რა საპარო ღრეჩოს გასწვრივ, როტორის ზედაპირულ ფენაში



ნახ. 413. როტორის გრიგალური დენებით გაპირობებული ელექტრომაგნიტური ძალები.

აღძრავს ციყვის ბორბლის დენების მსგავს გრიგალურ დენებს. ამ დენების მიმართულება, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 413-ზე წერტილებითა და ჯერებით, განისაზღვრება ე. მ. ძ-ის აღძვრის საერთო კანონით. ეს დენები არაა დიდი სიდიდის, ვინაიდან მათ გავრცელებას ხელს უშლის ფოლადის ფურცლებს შორის იზოლაცია.

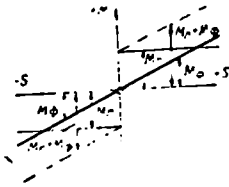
გრიგალური დენების კონტურების ინდუქტიური ხასიათის გამო მათი დამამავნიტებელი ძალის ტალღა არეს ტალღას ჩამორჩება კუთხით, რომელიც მეტია, ვიდრე $\frac{\pi}{2}$

და ტოლი $\frac{\pi}{2} + \delta$. გრიგალური დენები არესთან ურთიერთქმედებით ქმნიან როტორის ზედაპირზე ორივე ნიშნის ელექტრომაგნიტურ ძალებს, მაგრამ ამ ძალების რეზულტიური მომენტი M_{Σ} ყოველთვის მოქმედებს როტორის მიმართ არეს მოძრაობის მიმართულებით. სინქრონიზმის ახლოს გრიგალური დენები სრიალის პროპორციულია, ამიტომ უცვლელი არეს მნიშვნელობის შემთხვევაში M_{Σ} მომენტიც სრიალის პირდაპირ პროპორციულად იცვლება (ნახ. 414). ძრალ რეჟიმში მომენტი M_{Σ} სასარგებლოა, გენერატორულ რეჟიმში კი დამამუხრუქებელი.

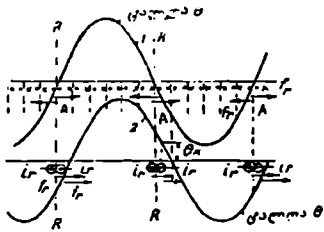
ჰისტერეზისიც, რომელსაც ადგილი აქვს როტორის ვადამავნიტების დროს, აგრეთვე ჰქმნის ბრუნვის მომენტს. ამ მომენტის წარმოშობის მიზეზის გამოსარკვევად თავდაპირველად განვიხილოთ როტორის სინქრონული ბრუნვა ($s=0$). ამ შემთხვევაში Θ დამამავნიტებელი ძალის ტალღა უძრავია როტორის მიმართ და როტორი, დამავნიტდება რა ერთხელ, აღარ განიცდის ვანმავნიტებას. დავყოთ როტორი რიგ ელემენტარულ მავნიტებად (ნახ. 415). მათი მოლეკულური დენების მიმართულება წერტილებით და ჯერებითაა ნაჩვენები: ეს დენები საპოლუსო დანაყოფის შუა ნაწილში თითქმის სავსებით აკომპუსირებს ერთმანეთს და, მხოლოდ სხვდასხვა პოლარობის ზონების

გამყოფ L_1-L_2 ხაზის ახლოს რჩება არაკომპენსირებული და არსებობს i_r დენების სახით. ეს დენები მანქანის გრაგნილების მიერ შექმნილ გარეშე არესთან ურთიერთქმედებაში ჰქმნის f_2 ძალებს, რომელთა მომენტი, როგორც ნახ. 415-ის ზემო ნაწილიდან ჩანს, ჯამში ნულის ტოლია.

დაეუშვათ ეხლა რომ სინქრონიზმი დაირღვა და θ ტალღამ დაიწყო გადაადგილება როტორის მიმართ. ტალღის 1 მდებარეობიდან 2 მდებარეობაში გადასვლის დროს ჰისტერეზისული დაგვიანების გამო მოლეკულარული დენები A მაგნიტებში ჯერ კიდევ ინარჩუნებენ პირვანდელ მიმართულებას. და i_r დენები სივრცეში გადაადგილებულ გარეშე არესთან ურთიერთქმედებით ჰქმნიან როტორის მიმართ არეს მიმართულებით მოქმედ ბრუნვის M_r მომენტს. ეს ჰისტერეზისული მომენტი ირ იქნება დამოკიდებული არეს ბრუნვის სიჩქარეზე, და განისაზღვრება იმ θ_2 კოეფიციენტიული ძალით, რომლის დროსაც ელემენტარულ მაგნიტებში დენის ძალა იწყებს თავის მიმართულების შეცვლას. როტორის მიმართ θ ტალღის მოძრაობის მიმართულების შესაბამისად ძრავულ რეჟიმში M_r მომენტი სასარგებლოა (ნახ. 414), გენერატორულში კი მამუხრუქებელი. სინქრონიზმზე გადასვლის დროს ჰისტერეზისული მომენტი ნახტომით იცვლის თავის მნიშვნელობას $+M_r$ -დან $-M_r$ -მდე. უძრავი როტორის შემთხვევაში ($f_2 = f_1$) და გრივლურ



ნახ. 414.



ნახ. 415. ელექტრომაგნიტური ძალების ჰისტერეზული მომენტი.

დენებზე დანაკარგებს თუ აღენიშნავთ სათანადოდ P_{12} და P_{ϕ_2} , მაშინ უსველი არეს პირობებში S სრიალის დროს ეს დანაკარგები ტოლი იქნება:

$$P_{2\phi_2} = s P_{12} + s^2 P_{\phi_2} \quad (32,22)$$

ზემოთ დამტკიცებული იყო, რომ მაგნიტური არეს მიერ როტორზე გადაცემული სიმძლავრის s სრიალის პროპორციული ნაწილი იკარგება ელექტრული დანაკარგების სახით, ხოლო $(1-s)$ -ის პროპორციული, დანარჩენი ნაწილი კი გარდაიქმნება მექანიკურ სიმძლავრედ.

აღრე ჩვენ უგულებელვყოფდით დანაკარგებს როტორის ფოლადში მათი სიმციროს გამო. ახლა ვაჩვენოთ, თუ როგორ შეიძლება მათი აღრიცხვა. P_{12} სიმძ-

¹ θ დამამაგნიტებელი ძალის სინუსოიდური განაწილების დროს i_r დენი ახვევს სივრცეში განაწილებულია და აქვს მაქსიმუმი $R-R$ ხაზზე, მსჯელობის გამართების მიზნით სივრცეში განაწილებულ დენს შეეცვლით შეუურსულით, რაც გავლენას არ მოახდენს მიღებული შედეგების სისწორეზე.

ლაგრე როტორში დანაკარგებთან შემდეგი გამოსახულებითა დაკავშირებული:

$$P_{12} \cdot s = P_{12} + P_{\text{ფ}2}, \quad (32,23)$$

სადაც P_{12} — დანაკარგებია როტორის გრაგნილში.
ამიტომ (32,22) და (32,23)-ის თანახმად

$$P_{12} = \frac{P_{12}}{s} + P_{22} + sP_{\text{ფ}2}, \quad (32,24)$$

ან ყველა წევრის ω_1 -ზე გაყოფით მივიღებთ:

$$\frac{P_{12}}{\omega_1} = M = \frac{P_{12}}{s\omega_1} + \frac{P_{22}}{\omega_1} + \frac{sP_{\text{ფ}2}}{\omega_1} = Mi_2 + M_r + M_{\text{ფ}}, \quad (32,25)$$

სადაც

$$M_r = \frac{P_{22}}{\omega_1}, \quad M_{\text{ფ}} = s \frac{P_{\text{ფ}2}}{\omega_1},$$

ხოლო Mi_2 — i_2 დენისა და მაგნიტურ არეს შორის მოქმედებით გაპირობებული მომენტია.

M_r და $M_{\text{ფ}}$ მომენტები ჩვეულებრივად მცირე სიდიდისაა და ამიტომ მათ ხშირად უგულებელყოფენ.

ვ) ხასარგებლო მაბრუნე მომენტი ძრავის ლილვზე. როგორც ნაწ. 1 § 4-ბ-ში იყო ნაჩვენები, ასინქრონული ძრავის ლილვზე სასარგებლო სიმძლავრე ტოლია ძრავის მიერ განვითარებული სრული მექანიკური P'_2 სიმძლავრისა, საკისრებსა და ჰაერთან ხახუნზე P_m მექანიკური დანაკარგების გამოკლებით; P_m დანაკარგებს მიეკუთვნება აგრეთვე მანქანის გაშაცივებელ ვენტილატორების ბრუნვაზე დახარჯული სიმძლავრე, თუ ვენტილატორები მოთავსებულია ძრავის ლილვზე.

ამგვარად:

$$P_2 = P'_2 - P_m. \quad (32,26)$$

მაგრამ ეს ტოლობა სრული სიზუსტით მაინც არ გამოსახავს სასარგებლო სიმძლავრეს ლილვზე, რადგან მასში არასრულადაა აღრიცხული სტატორისა და როტორის ფოლადში დანაკარგების გავლენა.

ასინქრონული მანქანის ფოლადში დანაკარგები შეიძლება დაიყოს ორ ნაწილად: პირველი ნაწილი $P_{c1} + P_{c2}$, დაკავშირებულია გადამაგნიტების ძირითად სიხშირესთან და უშუალოდ კომპენსირდება ქსელიდან მიღებული ელექტრომაგნიტური სიმძლავრის ხარჯზე; მეორე ნაწილი $P_{\text{ფ}}$ გამოწვეულია ინდუქციის სივრცული და დროული რყევების უმაღლესი ჰარმონიკებით და ამ რყევების და ქსელის სიხშირის სხვაობის გამო არ შეიძლება კომპენსირებული იყოს უშუალოდ ელექტრომაგნიტური გზით ქსელიდან. ამ დანაკარგების საკომპენსაციოდ ქსელიდან მიღებულ სიმძლავრე წინასწარ გარდაიქმნება ძრავის მექანიკურ სიმძლავრედ, შემდეგ კი უკანასკნელის ხარჯზე დანაკარგების სიმძლავრედ, $P_{\text{ფ}}$ დანაკარგებს უწოდებენ ფოლადში დამატებით დანაკარგებს.

ამგვარად:

$$P_{12} = P_1 - P_{u_1} - P_{r_1}; \quad (32,27)$$

$$P_2' = P_{12} - P_{u_2} - P_{e_2}; \quad (32,28)$$

და

$$P_3 = P_2' - P_{e_3} - P_m. \quad (32,29)$$

ამ განტოლებების შესაბამისი ენერგეტიკული სქემა ასინქრონული ძრავისათვის ნაჩვენებია ნახ. 416-ზე.

(32,29) ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ სასარგებლო მაბრუნე მომენტი ტოლია

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{P_{12} - P_{u_2} - P_{e_2} - P_{e_3} - P_m}{\omega_2} \quad (32,30)$$

ზ) სიმძლავრე ასინქრონული მანქანის ლილვზე. განვიხილოთ ასინქრონული მანქანის ლერძზე განვითარებული სრული მექანიკური სიმძლავრის დამოკიდებულება სრიალისაგან. ზემოთ მიღებულის თანახმად:

$$P_2' = (1-s)P_{12} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' \frac{1-s}{s}}{\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} \quad (32,31)$$

მოენახეთ რა წარმოებულს $\frac{dP_2'}{ds}$ და გვეტოლებთ ნულს, შეგვიძლია მოენახოთ სრიალის ის მნიშვნელობა s'_m , რომლის დროსაც გვაქვს P_2' სიმძლავრის მაქსიმუმი.

ამოხსნა გვაძლევს:

$$s'_m = \frac{c_1 r_2'}{c_1 r_2' \pm \sqrt{(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}} \quad (32,32)$$

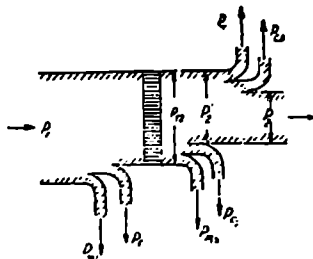
(32,8) და (32,32)-დან გამომდინარეობს, რომ $s_m \neq s'_m$ ლილვზე მაქსიმალური სიმძლავრის მიღება ხდება (32,31)-ში $s = s'_m$ -ის ჩასმით.

$$P_{2m} = \pm \frac{m U_1^2}{2c_1 [\pm (r_1 + c_1 r_2') + \sqrt{(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}]} \quad (32,33)$$

(32,32) და (32,33)-ში ნიშნები პლუსი და მინუსი ეკუთვნის შესაბამისად ძრავს და გენერატორულ რეჟიმებს.

(32,33) განტოლებიდან ჩანს, რომ მაქსიმალური მომენტისაგან განსხვავებით P_{2m} სიმძლავრის მნიშვნელობა დამოკიდებულია როტორის წრედში აქტიურ წინააღმდეგობაზე.

ნახ. 417-ზე შედარების მიზნით მოყვანილია $P_2 = \varphi_1(s)$ და $P_{12} = \varphi_2(s)$ მრუდები.



ნახ. 416.

33. ასინქრონული მანქანის შენაცვლების სქემები

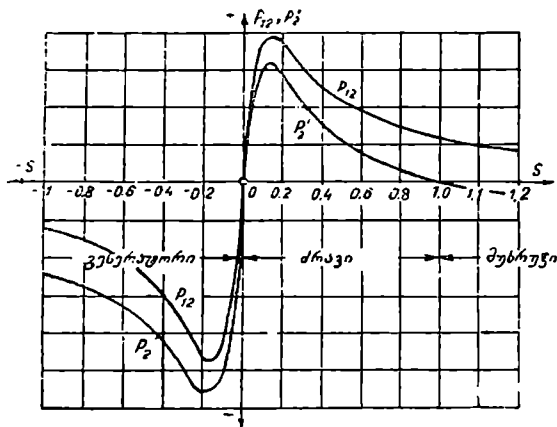
ასინქრონული მანქანის მუშა რეჟიმის გამოკვლევის დროს დიდ დახმარებას გვიწევს შენაცვლების სქემები (ეკვივალენტური სქემები), რომლებიც საშუალებას ვვაძლევს მეტად მარტივად დაეგვიყაროს თანათარღობა ასინქრონული მანქანის სახასიათო ცალკეულ სიდიდეებს შორის. გარდა აღნიშნულისა, შენაცვლების სქემები აადვილებს ასინქრონული მანქანის წრიული დიაგრამების შესწავლას (§ 34).

ასინქრონული მანქანის ვექტორულ განტოლებებს აქვთ სახე:

$$\dot{U}_1 = I_1 Z_1 + \dot{I}_0 Z_{12}; \quad (33,1)$$

$$0 = I_2' Z_2' + \dot{I}_0 Z_{12}; \quad (33,2)$$

$$I_1 + I_2' = \dot{I}_0. \quad (33,3)$$



ნახ. 417.

მაშინ შენაცვლების სქემა შიილებს ნახ. 420-ზე მოცემულ სახეს. ეს შენაცვლების სქემა ანალოგიურია ტრანსფორმატორის შენაცვლების სქემის აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში. (28,5)-ის თანახმად

$$P_2' = m_2 I_2'^2 r_2 \cdot \frac{1-s}{s} = m_1 I_2'^2 r_2' \cdot \frac{1-s}{s}, \quad (33,4)$$

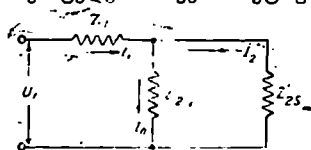
ამიტომ მანქანის მექანიკური სიმძლავრეების მიხედვით s სრიალისათვის შენაცვლების სქემაზე შეესაბამება ჯოულის დანაკარგების მეორადი წრედის ცვალებად აქტიურ წინა-

ცხადია, რომ

მიღებულ განტოლებებს შეესაბამება ნახ. 418-ზე ნაჩვენები შენაცვლების სქემა და ვექტორული დიაგრამა (ნახ. 419).

თუ Z_{2s}' წინააღმდეგობიდან გამოვყოფთ მეორადი გრაგნილის მიყვანილ წინააღმდეგობას

$$\begin{aligned} r_{2s}' &= \frac{r_2'}{s} + jx_2' = r_2' + \\ &+ jx_2' + r_2' \frac{1-s}{s} = \\ &= Z_2' + r_2' \frac{1-s}{s}, \end{aligned}$$

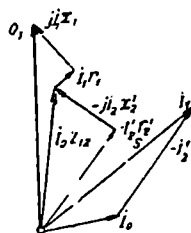


ნახ. 418. ასინქრონული მანქანის შენაცვლების სქემა.

აღმდგეობაში. $r'_2 \frac{1-s}{s}$ წინააღმდეგობის ცვლილების ზღვრები, ასინქრონული მანქანის მუშაობის სხვადასხვა რეჟიმებისათვის მოცემულია ქვემო ცხრილში¹.

$$I_2' \text{ დენის წრედში მოთხოვნილი სრული სიმძლავრე ტოლია } m_1 I_2' \frac{r_2'}{s} = P_{12}$$

და, მაშასადამე, ასინქრონული მანქანის მებრუნე მომენტის პროპორციულია. გენერატორული რეჟიმისათვის P_{12} სიმძლავრე მინუსი ნიშნითაა, რაც შეესაბამება უარყოფით მომენტს.



ნახ. 419.

ცხრილი 22

მუშაობის რეჟიმი	სრიალის საზღვრები		წინააღმდეგობის ცვლილების შესაბამისი საზღვრები $r'_2 \frac{1-s}{s}$	
	-დან	-მდე	-დან	-მდე
ძრავი	0	1	∞	0
მუხრუჭი	1	$+\infty$	0	$-r'_2$
გენერატორი	0	$-\infty$	$-\infty$	$-r'_2$

სინქრონიზმის დროს $s=0$, $r'_2 \frac{1-s}{s} = \infty$ და შენაცვლების სქემის დენი ტოლია:

$$\frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_{12}} = \frac{\dot{U}_1}{C_1 Z_{12}} = \dot{I}_{s_0} \quad (33,5)$$

როდესაც როტორი უძრავია ($s=1$), მანქანა მოკლდება ჩაკეტილი. შენაცვლების სქემის თანახმად მოკლედ შერთვის დენი ტოლია:

$$\dot{I}_{1k} = \frac{\dot{U}_1}{Z_2 Z_{12}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{1k}}$$

Z_{1k} წინააღმდეგობას მოკლედ შერთვის წინააღმდეგობას უწოდებენ და წარმოადგენს ასინქრონული მანქანის მეტად მნიშვნელოვან პარამეტრს. (31,16)-ის თანახმად $\frac{Z_{12} + Z_2'}{Z_{12}} = C_2$.

ამიტომ Z_{1k} წინააღმდეგობა შეიძლება წარმოადგენილი იქნეს შემდეგი სახით:

$$Z_{1k} = Z_1 + \frac{Z_{12} Z_2'}{Z_{12} + Z_2'} = Z_1 + \frac{1}{C_2} Z_2' \quad (33,6)$$

¹ სინქრონულ ასინქრონული მანქანა მუშაობს 'სრიალის' $s = -0.2 \div 2.2$ დარგლებში. ის რეჟიმები, რომლებიც შეესაბამება სრიალის სხვა მნიშვნელობებს შეიძლება განხილულ იქნეს მხოლოდ როგორც თეორიული რეჟიმები.

თუ მანქანას მეორადი მხრიდან ვკვებავთ (როტორის რგოლების მხრიდან) დაპირველად გრაფილის მოკლედ ჩაეკეტავთ, მაშინ ნახ. 420-ის სქემის თანახმად მოკლედ შერთვის წინააღმდეგობა ტოლი იქნება:

$$Z'_{2k} = Z'_2 + \frac{Z_1 Z_{12}}{Z_1 + Z_{12}} = Z'_2 + \frac{Z_1}{C_1}. \quad (33,7)$$

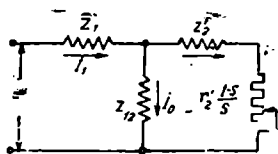
თუ მივიღებთ, რომ $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$, ე. ი. $C_1 = c_1$ და $C_2 = c_2$, Z_{1k} და Z_{2k} წინააღმდეგობისათვის შეგვიძლია დაეწერათ შემდეგი გამოსახულებანი:

$$Z_{1k} = Z_1 + \frac{1}{C_2} Z'_2 = \left(r_1 + \frac{1}{c_2} r'_2 \right) + j \left(x_1 + \frac{1}{c_2} x'_2 \right) = r_{1k} + j x_{1k}; \quad (33,8)$$

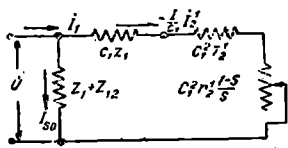
$$Z_{2k} = Z'_2 + \frac{1}{C_1} Z_1 = \left(r'_2 + \frac{1}{c_1} r_1 \right) + j \left(x'_2 + \frac{1}{c_1} x_1 \right) = r'_{2k} + j x'_{2k}. \quad (33,9)$$

აქ r_{1k} და r'_{2k} — აქტიური, ხოლო x_{1k} და x'_{2k} — ინდუქტიური წინააღმდეგობებია მოკლედ შერთვის დროს სტატორისა და როტორის გრაფილების მხრიდან.

ნახ. 420-ზე მოცემული შენაცვლები ნაკლს წარმოადგენს მასში კენძური წერტილის არსებობა Z_1 და Z'_2 წინააღმდეგობებს შორის. კენძური წერტილი სრიალის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის, საგრძნობლად ართულებს



ნახ. 420.



ნახ. 421.

I_1 , I_0 და I_2 დენების ანგარიშს. ეს ნაკლი შეიძლება მოვსპოთ, თუ შენაცვლების სქემას დაეყვანათ ნახ. 421-ზე მოცემულ სახემდე.

ნახ. 420-ის სქემიდან გვაქვს:

$$I_0 = (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1) Y_{12}. \quad (33,10)$$

ვინაიდან

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 = \dot{U}_1 Y_{12} - \dot{I}_1 Z_1 Y_{12} - \dot{I}_2,$$

ამიტომ

$$\dot{I}_1 = (1 + Z_1 Y_{12}) \dot{I}_1 C_1 = \dot{U}_1 Y_{12} - \dot{I}_2,$$

საიდანაც

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{Y_{12}}{C_1} - \frac{1}{C_1} \dot{I}_2$$

თუ მხედველობაში მივიღებთ (31,11) და (33,5) განტოლებებს, საბოლოოდ გვექნება:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 \frac{1}{C_1} \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_{12}} + \frac{\dot{U}_1}{C_1 (Z_1 + C_1 Z'_2)}. \quad (33,12)$$

მიღებულ განტოლებას უშუალოდ მივაყვართ ნახ. 421-ზე ნაჩვენებ შენაცვლების სქემამდე. უნდა შევნიშნოთ, რომ მოცემული სქემის პრაქტიკული სარგებლობის შემთხვევაში P_2' სიმძლავრის ანგარიში აგრეთვე მეტად მარტივია:

$$P_2' = m_1 I_2' r_2' \frac{1-s}{s} = m_1 \left| \frac{1}{C_1} I_2' \right|^2 C_1^2 r_2' \frac{1-s}{s} \quad (33,12)$$

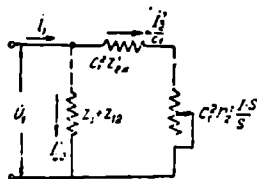
ე. ი. სიმძლავრე P_2' ტოლია m_1 ფაზათა რიცხვის სქემის მარჯვენა შტოში მოქმედი დენის ძალის მოდულის კვადრატისა და ამ შტოს ცვლადი წინააღმდეგობის მოდულის ნამრავლი s სრიალის მოცემული მნიშვნელობისათვის.

სიმძლავრე:

$$P_{1,2} = P_2' : (1-s). \quad (33,13)$$

ნახ. 421-ის შენაცვლების სქემის პრაქტიკული გამოყენების დროს ზოგჯერ ხელსაყრელია მისი წარმოდგენა ნახ. 422-ზე ნაჩვენები სახით.

მოცემული ბოლო ორი სქემის მსგავსება გამომდინარეობს (33,7) ტოლობიდან:



ნახ. 422. სახეშეცვლილი შენაცვლების სქემა ორი პარალელური შტოთი.

$$C_1 Z_1 + C_1^2 Z_2' = C_1^2 (Z_1 + Z_2') = C_1^2 Z_2', \quad (33,14)$$

34. ასინქრონული მანქანის წარუღი დინამიკა

ა) წარუღი დინამიკის დანიშნულება. მოცემული ელექტრული მანქანის თვისებებზე და ამა თუ იმ დანადგარში მისი ვარჯისაანობის ხარისხზე შესჯელობისათვის საჭიროა გვექონდეს მისი მუშა მრუდები, რომლებსაც სხვა-ნაირად მუშა მახასიათებლებს უწოდებენ. ასინქრონული ძრავის შემთხვევაში მუშა მრუდები ახასიათებს როტორის ბრუნვის სიჩქარის ცვლილებას დატვირთვის მიხედვით, მამრუნი მომენტის, სტატორის დენის, $\cos \varphi$, მ. ქ. კ.-ის ცვლილებას სასარგებლო სიმძლავრის ან ბრუნვათა რიცხვის მიხედვით წუთში. ძრავის შეფასებისათვის აგრეთვე აუცილებელია მისი გადატვირთვის უნარიანობის და მთელი რიგი სხვა თვისებების ცოდნა.

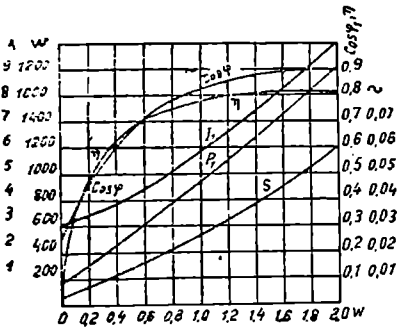
ნახ. 423-ზე მაგალითის სახით მოყვანილია შცირე სიმძლავრის ასინქრონული ძრავის მუშა მრუდები.

მუშა მრუდების მიღება შესაძლებელია მანქანის უშუალოდ გამოცდის (დატვირთვის) და ყველა ჩვენთვის საინტერესო სიდიდეების გაზომვის გზით.

მხოლოდ, ცოტად თუ ბევრად საგრძნობი სიმძლავრის მანქანებისათვის უშუალოდ დატვირთვა მანქანის გამოცდის პირობებში წარმოადგენს რთულ, ძვირსა და ხშირად აგრეთვე განუხორციელებელ ოპერაციას.

ასინქრონული მანქანის მახასიათებლების მიღება შესაძლებელია ძალზე მარტივად, ეგრეთწოდებული წარუღი დინამიკიდან, რომელიც იგება

ზნობოდ ორი ცდის საფუძველზე: უქმი სვლისა და მოკლედ შერთვის ცდებით. ეს ცდები საგრძნობლად მარტივია და მოითხოვს შედარებით მცირე დროსა და ენერჯიის უმნიშვნელო ხარჯს. რაც შეეხება წრიული დიაგრამებიდან მიღებულ გამოკვლევის შედეგებს, ისინი განსაზღვრულ ფარგლებში მცირედ განსხვავდება უშუალოდ ცდით მიღებული შედეგებისაგან. ამ მეთოდის სიზუსტე უმრავლეს შემთხვევაში სრულიად საკმარისია პრაქტიკული მიზნებისათვის.



ნახ. 423.

გარდა ამისა, წრიული დიაგრამა საშუალებას გვაძლევს მარტივად და თვალსაჩინოდ შევადაროთ ცალკეული პარამეტრების გავლენა ასინქრონული მანქანის მუშა პროცესზე, ამიტომ წრიული დიაგრამის აგების მეთოდს მეტად დიდი ყურადღება ექცეოდა ასინქრონული მანქანის განვითარების მთელ მანძილზე.

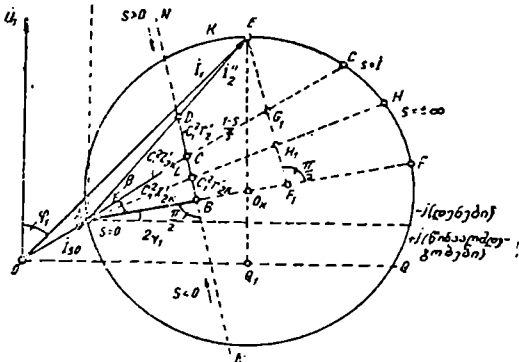
ბ) წრიული დიაგრამის აგება. როდესაც $\dot{U}_1 = \text{const}$. ცვალებადი სრიალის შემთხვევაში დენის ძალის I_1 ვექტორი ნახ. 422-ის თანახმად შეიძლება წარმოვიდგინოთ ორი ვექტორის ჯამის სახით: მუდმივი ვექტორის

$$I_{s0} = \frac{U_1}{Z_1 + Z_2} \quad (34,1)$$

და სრიალისაგან დამოკიდებული ცვლადი ვექტორის სახით

$$- \frac{I_2}{C_1} = I' = \frac{U_1}{C_1 Z_2 + C_1 r_2' \frac{1-s}{s}} \quad (34,2)$$

მოენახოთ მრუდი, რომელზედაც r სრიალის ცვლილების შემთხვევაში სრიალებს დენის I_1 ვექტორის ბოლო.



ნახ. 424. წრიული დიაგრამის აგება.

ამ მიზნისათვის გამოვიყენოთ ინვერსიის მეთოდი და ვისარგებლოთ ასინქრონული მანქანის ნახ. 422-ზე მოცემული შენაცვლების სქემით. გადავლოთ ძაბვის ვექტორი \dot{U}_1 და დენის ვექტორი I_{s0} (ნახ. 424). სრიალის ნე-

ბისმერი მოცემული მნიშვნელობისათვის. მოვნახოთ I' , დენის ვექტორის მდებარეობა.

შენაცვლების სქემის მარჯვენა შტოს კომპლექსური წინააღმდეგობებისათვის კოორდინატა სათავე შეეუთავსოთ A წერტილს. არსი ღერძი (+) მიემართოთ \bar{U}_1 ვექტორის პარალელურად. კოორდინატა ამ სისტემაში გადავზომოთ მონაკვეთი $\bar{AB} = c_1^2 \cdot x'_{21}$, ეს მონაკვეთი მობრუნებული იქნება $+j$ ღერძის მიმართ $2\gamma_1$ კუთხით, რამდენადაც წინააღმდეგობა $+jx'$; მრავლდება $C_1^2 = c_1^2 e^{2j\gamma_1}$. ხე. AB მონაკვეთის მართობულად გადავზომოთ მონაკვეთი $\bar{BC} = c_1^2 r'_{21}$.

ვინაიდან წმინდა აქტიური r'_{21} წინააღმდეგობა c_1^2 კომპლექსზეა განკარგებული, ამიტომ BC მონაკვეთის მიმართულება არს (+) ღერძთან $2\gamma_1$ კუთხეს შეადგენს. ჩამკეტი მონაკვეთი $AC = C_1^2 Z'_{21}$. ავილოთ ნებისმიერი დადებითი მნიშვნელობა $s < 1$ და გადავზომოთ მონაკვეთი $CD = C_1^2 r'_{21} \frac{1-s}{s}$,

როგორც \bar{BC} მონაკვეთის გაგრძელება. ასეთ პირობებში ჩამკეტი მონაკვეთი $\bar{AD} = C_1^2 Z'_{21} + c_1^2 r'_{21} \frac{1-s}{s}$, ე. ი. შენაცვლების სქემის მარჯვენა შტოს სრული წინააღმდეგობის ტოლია.

ადვილად დავინახავთ, რომ სრიალის სხვა ნებისმიერი s' მნიშვნელობებისათვის წერტილი D ყოველთვის NN სწორ ხაზზე დარჩება.

ინვერსიის მეთოდიდან ცნობილია, რომ, თუ ცვლადი კომპლექსური წინააღმდეგობის ვექტორის ბოლო სწორ ხაზზე გადაადგილდება, მაშინ ამ წინააღმდეგობაში გამავალი დენის ვექტორის ბოლო გადაადგილდება წრეხაზზე, რომლის ცენტრი მდებარეობს კოორდინატა სათავედან წინააღმდეგობების სწორ ხაზზე დაშვებულ მართობზე. ამ დროს ღერძი წინააღმდეგობებისათვის $+j$ ღერძი დენის ვექტორებისათვის $-j$ ღერძად გადაიქცევა. აქედან გამომდინარეობს, რომ I_2'' ვექტორის ბოლო გადაადგილდება k წრეხაზზე, რომლის ცენტრი \bar{AB} მონაკვეთის გაგრძელებაზე მდებარეობს. კერძოდ, D წერტილის შესაბამე წინააღმდეგობისათვის I_2'' დენი AE მონაკვეთის ტოლი იქნება.

ვინაიდან $I_1 = I_0 + I_2''$, ამიტომ ნახ. 424-დან გამომდინარეობს, რომ მუდმივი \bar{U}_1 ძაბვისა და ცვალებადი დატვირთვის (s სრიალის) დროს I_1 პირველადი დენის ვექტორის ბოლო წრეხაზზე გადაადგილდება. ეს წრეხაზი ყველა დამხმარე აგებებით, რომლებიც ქვემოთ იქნება განხილული, ატარებს ასინქრონული მანქანის წრეული დიაგრამის სახელწოდებას.

განვიხილოთ ახლა წრეული დიაგრამის ცალკეული ელემენტები.

როგორც ნახ. 424-დან ჩანს, წრეული დიაგრამის დიამეტრი უდრის I_2'' დენის მაქსიმალურ მნიშვნელობას, რომელსაც ადგილი აქვს ისეთი სრიალის დროს, როდესაც შენაცვლების სქემის მარჯვენა შტოს წინააღმდეგობა მინიმალურია და ტოლი $\bar{AB} = c_1^2 x'_{21}$ მონაკვეთის.

¹ γ_1 კუთხეს ჩვეულებრივად უარყოფითი მნიშვნელობა აქვს. ამიტომ x'_{21} ვექტორი ნახ. 424-ზე მობრუნდება $+j$ ღერძიდან (+) ღერძისაკენ.

$$\overline{AF} = -\frac{U_1}{c_1^2 X'_{2k}} = D_k, \quad (34,3)$$

ე. ი. წრიული დიაგრამის დიამეტრი D_k ზოკლედ შერთვის წინააღმდეგობის რეაქტიული მდგენელის უკუპროპორციულია და პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული გრაფილების აქტიური წინააღმდეგობისაგან¹.

წრიული დიაგრამის ცენტრი განისაზღვრება ვექტორით:

$$OO_k = I_{0k} + \frac{U_1}{2c_1^2 X'_{2k}}. \quad (34,4)$$

(34,3) და (34,4) ტოლობები საესებით განსაზღვრავს k წრეხაზის მდებარეობას ვექტორული დიაგრამის O წერტილის მიმართ.

უძრავი როტორის შემთხვევაში (მოკლედ შერთვა) $s=1$ და D წერტილი ენთხვევა C წერტილს, ამიტომ I_{1k} დენის ვექტორის ბოლო ძეგს G წერტილში, რომელიც მიიღება \overline{AC} მონაკვეთის გაგრძელებით k წრეხაზის გადაკვეთამდე.

სრიალის $s=1$ -დან $s=0$ -მდე ცვლილების დროს D წერტილი სრიალებს NN სწორ ხაზზე ზევით C წერტილიდან უსასრულობამდე. ამის შესაბამისად I_1 დენის ვექტორი გადაადგილდება k წრეხაზზე G წერტილიდან A წერტილისაკენ (E წერტილის გავლით). ამგვარად, რკალი GEA შეესაბამება ასინქრონული მანქანის მუშაობას ძრავლ რეჟიმში. სრიალის $s=1$ -დან $s=-\infty$ -მდე ცვლილების დროს D წერტილი გადაადგილდება C წერტილიდან L წერტილამდე, ამასთან $\overline{CL} = -c_1^2 r'_2$ და $\overline{BL} = c_1^2 (r'_{2k} - r'_2)$. I_1 დენის ვექტორის ბოლო ამ დროს გადაადგილდება k წრეხაზის G წერტილიდან H წერტილისაკენ. რკალი GH შეესაბამება სამუხრუჭო რეჟიმს.

გენერატორულ რეჟიმში სრიალი იცვლება $s=0$ -დან $s=-\infty$ -მდე. D წერტილი ამ დროს გადაადგილდება ქვევიდან NN ხაზზე—უსასრულობიდან L წერტილისაკენ, რადგანაც $c_1^2 r'_2 \frac{1-s}{s} < 0$. I_1 დენის ვექტორის ბოლო გენერატორულ რეჟიმში ზომრარბს წრეხაზზე A წერტილიდან H წერტილამდე (F წერტილის გავლით).

ამგვარად, წრიული დიაგრამის მთელი წრეხაზი იყოფა სამ ნაწილად:

რკალი GEA —ძრავლი რეჟიმი,

GH —სამუხრუჭო რეჟიმი,

„ AFH —გენერატორული რეჟიმი.

წრიული დიაგრამა გვაძლევს თვალსაჩინო წარმოდგენას როტორის გრაფილში დენის ცვალებადობის შესახებაც, რადგან

$$-I_2'' = \frac{I_2'}{c_1} \approx I_2'. \quad (34,5)$$

¹ აქტიური წინააღმდეგობები, მხოლოდ უნიშვნელოდ მოქმედებს C_1 სიდიდებზე.

გ) ახინქრონული ძრავის მუშაობის დამახასიათებელი ძირითადი სიდიდეების განსაზღვრა წრიული დიაგრამიდან. წრიული დიაგრამიდან ძირითადი სიდიდეების განსაზღვრა განვიხილოთ ძრავული რეჟიმისათვის (სამუხრუქო და გენერატორული რეჟიმები იხ. § 37 და 38).

1. პირველადი სიმძლავრე P_1 . ძრავის სტატორზე მოყვანილ P_1 სიმძლავრე ტოლია:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

როდესაც $U_1 = \text{const}$. P_1 სიმძლავრე სტატორის დენის აქტიური მდგენელის პროპორციულია $I_1 \cos \varphi_1 = P_1$, ამიტომ წრიულ დიაგრამაზე I_1 დენის ნებისმიერი მნიშვნელობისათვის P_1 სიმძლავრე I_1 დენის ვექტორის ბოლოდან აბსცისათა ღერძზე დაშვებულ $\overline{E\overline{Q}_1}$ მართობის სიგრძის პროპორციული იქნება (ნახ. 424).

ამგვარად, დენის მასშტაბში გაზომილი $\overline{E\overline{Q}_1}$ მონაკვეთი გადამრავლებული $m_1 U_1$ -ზე მოგვცემს P_1 სიმძლავრეს:

$$P_1 = m_1 U_1 \overline{E\overline{Q}_1}. \quad (34,6)$$

OQ ხაზს, სადამდეც იღება \overline{EQ} , მონაკვეთები, პირველადი სიმძლავრის ხაზი ეწოდება. წრიული დიაგრამიდან აღვიღოთ მაქსიმალური პირველადი P_{1m} სიმძლავრის პოვნაც. ამისათვის საკმარისია პირველადი სიმძლავრის ხაზიდან აღვმართოთ O_2 ცენტრზე გაშვავი მართობი (ნახ. 425), მაშინ

$$P_{1m} = m_1 U_1 \overline{E_1\overline{Q}_2}. \quad (34,7)$$

2. P'_2 სიმძლავრე ძრავის ლილვზე. E წერტილიდან წრეხაზის დიამეტრზე დაუშვათ EF_1 მართობი. ნახ. 424-დან მივინახათ:

$$\begin{aligned} m_1 U_1 \cdot \overline{EF_1} &= m_1 \dot{U}_1 I_2'' \sin \beta = m_1 U_1 I_2'' \frac{\overline{BD}}{\overline{AD}} = \\ &= m_1 U_1 I_2'' \left| \frac{C_1^2 r_2' s + C_1^2 r_2' \frac{1-s}{s}}{C_1^2 Z_2' s + C_1^2 r_2' \frac{1-s}{s}} \right| = m_1 I_2'' \left| C_1^2 r_2' s + C_1^2 r_2' \frac{1-s}{s} \right|. \quad (34,8) \end{aligned}$$

ვინაიდან, მეორეს მხრივ,

$$\begin{aligned} \overline{EF_1} &= \overline{G_1 F_1} + \overline{EG_1}, \\ \frac{\overline{G_1 F_1}}{\overline{EG_1}} &= \frac{\overline{CB}}{\overline{DC}} = \frac{c_1 r_2' s}{c_1 r_2' \frac{1-s}{s}} \end{aligned}$$

და

$$m_1 U_1 \overline{EF_1} = m U_1 \cdot (\overline{G_1 F_1} + \overline{EG_1}),$$

ამიტომ (34,8)-დან გამომდინარეობს, რომ

$$m_1 U_1 \overline{EG}_1 = m_1 I_2'^2 \cdot c_1^2 r_2' \frac{1-s}{s} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} = P_2'. \quad (34,9)$$

ამგვარად, წრიული დიაგრამიდან P_2' სიმძლავრის განსაზღვრისათვის საკმარისია დენის მასშტაბში გაეზომოთ \overline{EG}_1 მონაკვეთი და გადავამრავლოთ $m_1 U_1$ -ზე. AG ხაზს. სადამდეც \overline{EG}_1 მონაკვეთების აღება ხდება, უწოდებენ სიმძლავრეების ხაზს ლილვზე.

წრიული დიაგრამიდან ადვილად შეიძლება მოიძებნოს P_{2m} მაქსიმალური სიმძლავრე ძრავის ლილვზე. ამისათვის საკმარისია O_k ცენტრიდან დაეშვათ მართობი სიმძლავრეების ხაზზე (ნახ. 425), მაშინ

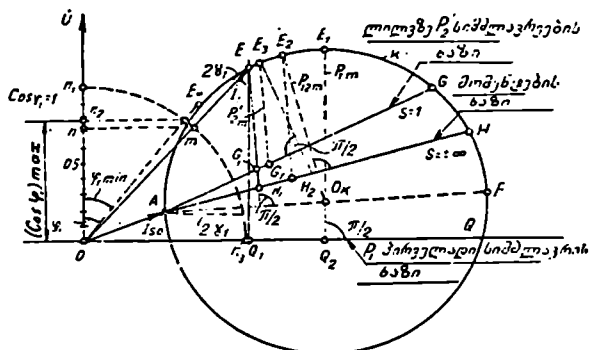
$$P_{2m} = m_1 U_1 \cdot \overline{E_3 G_3}. \quad (34,10)$$

3. P_{12} სიმძლავრე და M მომენტი ძრავის ლილვზე. წინა მასალიდან გამომდინარეობს, რომ $\overline{LC} = c_1^2 r_2'$, ამიტომ:

$$\frac{\overline{H_1 E}}{G_1 E} = \frac{\overline{LD}}{\overline{CD}} = \frac{\overline{LC} + \overline{CD}}{\overline{CD}} = \frac{c_1^2 r_2' + c_1^2 r_2' \frac{1-s}{s}}{c_1^2 r_2' \frac{1-s}{s}} = \frac{1}{1-s} = \frac{P_{12}'}{P_2'}$$

საიდანაც (34,9)

$$P_{12} = \frac{P_2'}{G_1 E} \overline{H_1 E} = m_1 U_1 \cdot \overline{H_1 E}. \quad (34,11)$$



ნახ. 425. ასინქრონული მანქანის პარამეტრების განსაზღვრა წრიული დიაგრამიდან.

ამგვარად, P_{12} სიმძლავრე წრიული დიაგრამიდან განისაზღვრება, როგორც $\overline{H_1 E}$ მონაკვეთის ნამრავლი $m_1 U_1$ -ზე.

სიმძლავრე P_{12} ერთდროულად გამოსახავს M მომენტს ძრავის ლილვზე, ამიტომ

$$M = m_1 U_1 \cdot \overline{H_1 E}. \quad (24,12)$$

AH ხაზს, სადამდეც $\overline{H_1 E}$ მონაკვეთების აღება ხდება, უწოდებენ მომენტების ხაზს.

თუ O_2 ცენტრიდან ვუშვებთ მართობს მომენტების ხაზზე (ნახ. 425), მაშინ მონაკვეთი $E_2 H_2$ განსაზღვრავს P_{12m} მაქსიმალურ სიმძლავრეს და იმავე დროს M_m მაქსიმალურ მომენტს, რომელსაც ძრავი აწვითარებს მოცემული U_1 ძაბვის დროს:

$$P_{12m} = m_1 U_1 \overline{E_2 H_2}; \quad (34,13)$$

$$M_m = \frac{m_1 U_1}{\omega_1} \cdot \overline{E_2 H_2}. \quad (34,14)$$

4. სიმძლავრის კოეფიციენტი $\cos \varphi_1$. სიმძლავრის კოეფიციენტი $\cos \varphi_1$ შესაძლებელია განსაზღვრულ იქნეს წრიული დიაგრამიდან φ_1 კუთხის უშუალოდ გაზომვით ან მარტივით, ნახ. 425-ზე ნაჩვენები გრაფიკული ხერხით. ერთეული სიგრძის $\overline{O n_1}$ რადიუსით O წერტილიდან აგებენ წრეხაზის $n_1 n_2$ რკალს. თუ რკალის I_1 დენტან m გადაკვეთის წერტილს დაეგვეგმილებთ ორდინატთა ღერძზე, n წერტილში მივიღებთ $\cos \varphi_1$ მნიშვნელობას. სიმძლავრის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა ($\cos \varphi_1$)_{max} განისაზღვრება O წერტილიდან k წრეხაზამდე გატარებული OE_k მხებით. მონაკვეთი $\overline{O n_2} = (\cos \varphi_1)_{max}$.

5. სრიალი s . სრიალი შეიძლება განისაზღვროს როგორც შეფარდება (ნახ. 424):

$$\frac{G_1 H_1}{EH_1} = \frac{CL}{DL} = \frac{c_1^2 r_1^2}{c_1^2 r_1^2 + c_2^2 r_2^2} \frac{1-s}{s} = s. \quad (34,15)$$

მხოლოდ წრიული დიაგრამიდან სრიალის მონახვისათვის უფრო მოსახერხებელია ვისარგებლოთ ნახ. 426-ზე ნოყვანილი გრაფიკული აგებით. წრიული დიაგრამის ნებისმიერ T წერტილს ვაერთებთ H წერტილთან და TH -ის პარალელურად ვატარებთ სრიალის სკალას $\pm s$. T_1 წერტილში, რომელიც შეესაბამება სრიალის სკალისა და AT სწორი ხაზის გადაკვეთის წერტილს, დაიტანენ $s=0$. სრიალის სკალისა და TG სწორი ხაზის გადაკვეთის T_2 წერტილში დავეყათ $s=1$. სრიალის მთელ სკალას ყოფენ თანაბარ ნაწილებად, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 426-ზე. TE სწორი ხაზისა და სრიალის სკალის გადაკვეთის შესაბამისი T_3 წერტილი გვაძლევს სრიალის იმ მნიშვნელობას, რომელიც შეესაბამება წრიულ დიაგრამის E წერტილს.

ასეთი აგების სისწორე გამომდინარეობს სამკუთხედების მსგავსებიდან: $\triangle A H_1 G_1 \sim \triangle T_3 T_1 T$ და $\triangle T T_1 T_3 \sim \triangle E H_1 A_1$, რაც შეიძლება დამტკიცებულ იქნეს შესაბამისი კუთხეების ტოლობიდან: $\angle A_1 A G = \angle A T G$, $\angle G A H =$

$\angle GTH$, $\angle A_1AE = \angle ATE$, როგორც საერთო რკალზე დაყრდნობილი კუთხეები, $\angle HTG = \angle TT_2T_1$, $\angle A_1AG_1 = \angle AG_1H_1$ და $\angle A_1AE = \angle AEH_1$, როგორც ჯვარედინა კუთხეები.

სამკუთხედების მსგავსობიდან მივიღებთ:

$$\frac{G_1H_1}{AH_1} = \frac{TT_1}{T_1T_2},$$

$$\frac{AH_1}{EH_1} = \frac{T_1T_3}{TT_1},$$

თუ ამ პროპორციებს გადავამრავლებთ და მხედველობაში მივიღებთ (34,15), მოვნახავთ, რომ

$$T_1T_3 \cdot G_1H_1 = s \cdot T_1T_2 \cdot EH_1.$$

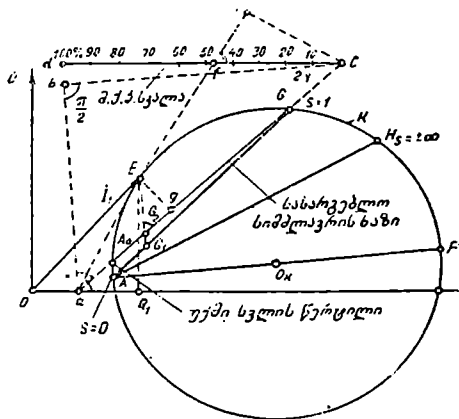
სრიალის ნულთან ახლო მცირე მნიშვნელობების დროს სრი-

ნახ. 426. სრიალის განსაზღვრა წრიული დიაგრამით.

ალის სკალის ნასშტაბი შეგვიძლია ნებისმიერად გაგზარდოთ, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 426-ზე.

6. ნარგვი კმედების კოეფიციენტი. წრიული დიაგრამა საშუალებას გვაძლევს აგრეთვე დიდი სიზუსტით განვსაზღვროთ ასინქრონული ძრავის დანაკარგები და მ. კ. კ.

წრიული დიაგრამის A_0 წერტილი (ნახ. 427), რომელიც შეესაბამება ძრავის უქმ სვლას, ზევითაა მოთავსებული, სინქრონიზმის A_1 წერტილთან შედარებით. ვინაიდან უქმი სვლის დროს ქსელიდან მიღებული P_1 სიმძლავრე მეტია, ვიდრე სინქრონიზმის დროს. ამ სიმძლავრეთა სხვაობა ტოლია მექანიკური, სავენტილაციო და ფოლადში დამატებითი დანაკარგების ჯამის $P_m + P_{ce}$ (ნაწ. 4, § 32). უქმი სვლისა და მოკლედ შერთვის



ნახ. 427. მ. კ. კ.-ის განსაზღვრა წრიული დიაგრამის საშუალებით.

შემთხვევებში სასარგებლო სიმძლავრე ძრავის ლივზე ნულის ტოლია, $P_2 = 0$; აქიტიომ, თუ A_0 და G წერტილებზე სწორ ხაზს გავატარებთ, მაშინ ის AG ხაზის მსგავსად შეგვიძლია განვიხილოთ, როგორც სასარგებლო სიმძლავრის ხაზი. ასეთ დროს $m_1 U_1 \cdot \overline{EG_2} = P_2$ ხოლო $m_1 U_1 \cdot G_1 \overline{G_2} \approx P_m + P_c$. ასევე $A_0 H$ ხაზი (ნახ. 431) შეგვიძლია მიახლოებით განვიხილოთ, როგორც სასარგებლო მომენტის ხაზი $M_2 = \frac{P_2}{\omega_2}$.

ამგვარად, საემარისი სიზუსტით შესაძლებელია მოინახოს ძრავის მ. ქ. კ., როგორც $\overline{EG_2}$ და $\overline{EQ_1}$ მონაკვეთების ფარდობა:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{m_1 U_1 \cdot \overline{EG_2}}{m_1 U_1 \cdot \overline{EQ_1}} = \frac{\overline{EG_2}}{\overline{EQ_1}}$$

ეს შეფარდება შესაძლებელია ადვილად მოიძებნოს ნახ. 427-ზე ნაჩვენებნი გრაფიკული გზით.

ნახ. 427-დან გამოვძინაროვბს, რომ $\triangle EG_2 G_1 \approx \triangle cab$; $\triangle EQ_1 a \approx \triangle chf$; $\triangle Ega \approx \triangle cha$.

ამ სამკუთხედების მსგავსობიდან ვვაქვს

$$\frac{\overline{EG_2}}{\overline{Eg}} = \frac{\overline{ac}}{\overline{bc}}; \quad \frac{\overline{Eg}}{\overline{Ea}} = \frac{\overline{ch}}{\overline{ac}}; \quad \frac{\overline{Ea}}{\overline{EQ_1}} = \frac{\overline{cf}}{\overline{ch}}$$

გადავამრავლებთ რა ზემო პროპორციებს, მივიღებთ

$$\frac{\overline{EG_2}}{\overline{EQ_1}} = \frac{\overline{cf}}{\overline{bc}} = \eta.$$

ამიტომ, თუ აბსცისათა ღერძის პარალელურ \overline{cf} მონაკვეთს გავაგრძელებთ და გადავზომავთ $\overline{cd} = \overline{cb}$, სადაც cd მიღებულია 100% , მაშინ f წერტილი უშუალოდ გვიჩვენებს ძრავის მ. ქ. კ., რომელიც შეესაბამება წრიული დიაგრამის E წერტილს.

თუ a წერტილიდან k წრეხაზის ნიშებს გავავლებთ და გავაგრძელებთ მას ნ. ქ. კ.-ის სკალის გადაკეთამდე, მაშინ გადაკეთის წერტილი მოგვცემს ძრავის მ. ქ. კ.-ის მაქსიმალურ მნიშვნელობას.

წრიული დიაგრამის საშუალებით შესაძლებელია სუფთა გრაფიკული გზით განსაზღვრული იქნეს ძრავის არა ზარტო საერთო დანაკარგები, არამედ დანაკარგების ცალკეული სახეებიც. დანაკარგების განსაზღვრის დაყოფითი მეთოდი წამოყენებული იყო ლაკურას (I. L. La Cour) მიერ. ვინაიდან აქ მეთოდმა დიდი გავრცელება ვერ ჰპოვა, ამიტომ ჩვენ მას არ განვიხილავთ.

ღ) წრიული დიაგრამის აგება უკმა ხვლისა და მოკლედ შერთვის ცდების მონაცემებით. ასინქრონული მანქანის წრიული დიაგრამა შესაძლებელია აგებულ იქნეს მოკლედ შერთვისა და უკმა ხვლის ცდების მონაცემებით.

1. უქმი სვლის ცდა. უქმი სვლის დროს ძრავის როტორი ბრუნავს დაუტვირთავად, ამასთან $s \neq 0$. ცდის დროს ზომიან უქმი სვლის P_0 სიმძლავრეს და უქმი სვლის I_{10}^1 დენს, სტატორის მომჭერებზე მოყვანილი U_1 ძაბვის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის. P_0 , I_{10} და U_1 გაზომილი სიდიდეებით პოლობენ $\cos \varphi_0$:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m_1 U_1 I_{10}}$$

P_0 , I_{10} და $\cos \varphi_0$ სიდიდეების ფუნქციონალური დამოკიდებულება მოღებული U_1 ძაბვისაგან დატანილია მრუდების სახით (ნახ. 428). თუ P_0 დანაკარგებს გამოვაკლებთ სტატორის გრაგნილში ჯოჯის დანაკარგებს

$$P_0 - m_1 I_{10}^2 r_1 \approx P_c + P_m$$

მივიღებთ ფოლადში P_c დანაკარგების და მექანიკური P_m დანაკარგების დამოკიდებულებას U_1 ძაბვისაგან.

დანაკარგები ფოლადში დამოკიდებულია მაგნიტური ნაკადის და, მაშასადამე, მოღებული ძაბვის სიდიდისაგან. როდესაც $U_1 = 0$, $P_c = 0$. ეს საშუალებას გვაძლევს გავაცალკევოთ P_c და P_m დანაკარგები. ამ

მოზნით $P_c + P_m = f(U_1)$ დამოკიდებულებების მრუდს განაგრძობენ ორდინატთა ღერძის გადაკვეთამდე და ლებულობენ F_m მექანიკური დანაკარგების ტოლ Oa მონაკვეთს.

მიღებული შედეგი საშუალებას გვაძლევს მოენახოთ წრეულ დიაგრამაზე A წერტილი სინქრონიზმის დროს ($s = 0$).

ანისათვის უქმი სვლის A_0 წერტილიდან ორდინატთა ღერძის პარალელურად გადავზომავთ მონაკვეთს

$$(ნახ. 429) \overline{A_0 A} = \frac{P_m}{m_1 U_1}$$

ასეთნაირად მიღებული A წერტილი შეესაბამება სინქრონიზმს და პრაქტიკულად მოთავსებული იქნება წრეულ დიაგრამაზე.

თუ P_c დამატებითი დანაკარგები ცნობილია, მაშინ აგება შესაძლებელია კიდევ უფრო დავაზუსტოდ, გადავზომავთ რა $\overline{A_0 A} = \frac{P_m + P_c}{m_1 U_1}$ მონაკვეთს.

ნომინალური ძაბვის დროს $I_{10} = (0,25 \div 0,4) I_n$.

2. მოკლედ შერთვის ცდა. მოკლედ შერთვის ცდას ატარებენ ქსელიდან მოდებული შემცირებული $U_k < U_{1H}$ ძაბვის ქვეშ, რათა სტატორის ღენმა დიდად არ გადააჰარბოს მის ნომინალურ I_{1H} დენს. როდესაც $I_{1k} = I_{1H}$ ასინქრონული მანქანის მოკლედ შერთვის ძაბვა $\frac{U_{1k}}{U_{1H}} \cdot 100 \approx (15 \div 30)\%$.

ნახ. 430-ზე წარმოდგენილია მოკლედ შერთვის მახასიათებლები

$$P_k, I_{1k}, \cos \varphi_{1k} = f(U_{1k}).$$

როგორც ნახ. 430-დან ჩანს, $I_{1k} = f(U_{1k})$ დამოკიდებულება დიდი დენის შემთხვევაში არასწორხაზობრივია; ეს ხდება იმის გამო, რომ დენის ზრდასთან ერთად იზრდება კბილის თავების გაქლენთვა და ამიტომ მცირდება x_{1k} წინააღმდეგობა. მოკლედ შერთვის ცდის შედეგების ნომინალურ ძაბვაზე გადაანგარიშების დროს სარგებლობენ შემდეგი შეფარდებებით:

$$I_{1k} = I_{1k}' \frac{U_{1H} - U_{0k}}{U_{1k} - U_{0k}}, \quad (34,16)$$

$$\cos \varphi_{1k} = \cos \varphi_{1k}'; \quad (34,17)$$

$$P_k = m_1 U_{1H} I_{1k} \cos \varphi_{1k}', \quad (34,18)$$

სადაც I_{1k} , P_k და $\cos \varphi_k$ მნიშვნელობები შეესაბამება ნომინალურ ძაბვას, ხოლო (1) ნიშნით აღნიშნულია ცდის დროს გაზომილი სიდიდეები.

3. წრიული დიაგრამის წრეხაზის, მომენტების ხაზის და სასარგებლო სიმძლავრის ხაზის აგება. უკვე სელისა და მოკლედ შერთვის

ცდების მონაცემებით ვაგებთ ნომინალური ძაბვის შესაბამის I_{20} და I_{1k} დენის ვექტორებს. თუ A და G წერტილებს შევავრთებთ, ჩვენ მივიღებთ AG სწორ ხაზს, რომელიც საძებნი წრეხაზის ქორდასაც წარმოადგენს (ნახ. 431).

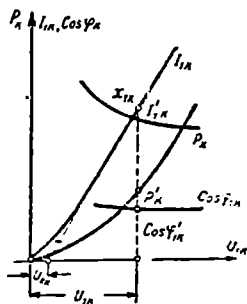
წრეხაზის O_k ცენტრი მდებარეობს C_1 ქორდის შუა წერტილიდან აღმართულ მართობზე.

მეორეს მხრივ, წრეხაზის ცენტრი O_k აგრეთვე მოთავესებული უნდა იყოს $\frac{\pi}{2} - \varphi_{2k} = \angle CAB$ კუთხით გატარებულ AF სწორ ხაზზე (ნახ. 424),

სადაც

$$\operatorname{tg} \varphi_{2k} = \frac{AB}{BC} = \frac{x'_{2k}}{r'_{2k}}.$$

პრაქტიკული მიზნებისათვის საკმარისი სიზუსტით შეიძლება ჩავთვალოთ $\varphi_{2k} \approx \varphi_{1k}$.



ნახ. 430.

სრულიად შეესაბამება ასინქრონული მანქანის ეკვივალენტურ სქემას და ამდენად ის შეიძლება ჩაითვალოს წრიული დიაგრამის ზუსტ აგებად.

პრაქტიკაში გამოყენება აქვს აგრეთვე წრიული დიაგრამის აგების მიხედვით ხერხებს. განვიხილოთ ორი მათგანი.

1. ჰეილანდის წრიული დიაგრამა. ა. ჰეილანდმა 1894—1896 წ. წ. პირველმა წამოაყენა ასინქრონული ძრავის მუშაობის პრაქტიკული გამოკვლევებისათვის წრიული დიაგრამის გამოყენების საკითხი.

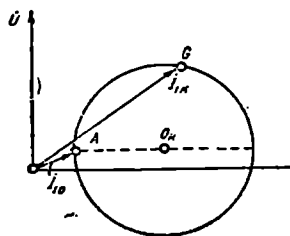
ჰეილანდმა თავისი დიაგრამა, უგულვებელყო რა სტატორის გრავნილის აქტიური წინააღმდეგობა და ჩათვალა, რომ მანქანის დატვირთვის ცვლის დროს სტატორის გრავნილთან რეზულტიური ნაკადუმბმა რჩება მუდმივი, თეორიულად დაასაბუთა.

ჰეილანდის წრიულ დიაგრამაში წრეხაზის აგება ხდება უქში სვლის A_0 მოკლედ შერთვის G წერტილებისა და აბსცისათა ღერძზე მოთავსებული O_2 ცენტრის მიხედვით (ნახ. 432). ძრავის სასარგებლო სიმძლავრის და მბრუნე მომენტის განსაზღვრის მიზნით ჰეილანდი იყენებდა ზემოთ განხილული წესებისაგან განსხვავებულ გრაფიკულ საშუალებებს.

ჰეილანდის დიაგრამის შედეგები ახლოსაა ზუსტი დიაგრამის შედეგებთან, მხოლოდ დიდი სიმძლავრის ძრავებისათვის.

2. გოლდშმიდტის (Goldschmidt) წრიული დიაგრამა.

გოლდშმიდტის მიერ 1900 წ. წამოყენებულმა დიაგრამამ საკმაოდ ფართო გავრცელება ჰპოვა. დიაგრამის პრაქტიკული აგება ხდება უქში სვლის A_0 მოკლედ შერთვის G წერტილების და O_2 ცენტრის მიხედვით, რომელიც ზუსტი დიაგრამისაგან განსხვავებით, მოთავსებულია A_0 წერტილიდან



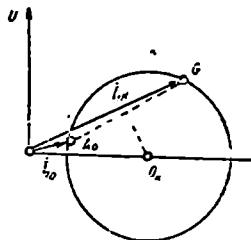
ნახ. 433. გოლდშმიდტის წრიული დიაგრამა.

აბსცისათა ღერძის პარალელურად გატარებულ სწორ ხაზზე (ნახ. 433). სხვა მხრივ გოლდშმიდტის დიაგრამა არაფრით არ განსხვავდება ზუსტი დიაგრამისაგან და ვაძლევს თითქმის იგივე შედეგებს.

გოლდშმიდტის დიაგრამის თეორიულ დასაბუთებას ჩვენ დაწვრილებით არ განვიხილავთ, ვინაიდან მიღებული დაშვებები სრულიად არ აადვილებს წრიული დიაგრამის არსებობის დამტკიცების მსვლელობას

და ამასთან ამ დამტკიცებას ხდის ნაკლებად დამარწმუნებელს.

გოლდშმიდტის წრიულ დიაგრამას საფუძვლად შეიძლება დაედოს ნახ. 434-ზე ნაჩვენები შენაცვლების სქემა.



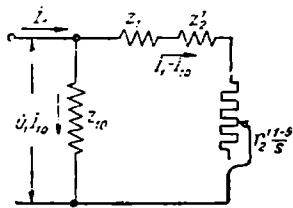
ნახ. 432. ჰეილანდის წრიული დიაგრამა.

ამ სქემაში უქმ სვლას (და არა სინქრონიზმს), შეესაბამება სრიალი $s=0$, ამიტომ ყველა დანაკარგი ხახუნზე, საენტილაციო და დამატებითი დანაკარგების ჩათვლით, გათვალისწინებულია Z_{10}^1 წინააღმდეგობის აქტიური ნდევნით. ეკვივალენტური სქემის მარჯვენა პარალელური შტო წარმოადგენს სტატორის, როტორის და დატვირთვის წინააღმდეგობების მიმდევრობით ნეერთებას G_1 შემასწორებელი კოეფიციენტების გარეშე $Z_1 + Z_2' + r_2' \frac{1-s}{s}$.

გოლდშმიდტის დიაგრამას შესაძლებელია მეტი სიზუსტე მიეცეთ, თუ პროფ. გ. პ. კოსტენკოს წინადადებით ნახ. 435-ის სქემის მარჯვენა შტოს ნახ. 421-ის შესაბამისად ვაუვლით რა $G_1 \approx c_1$, $\gamma_1 \approx 0$ P წარმოვიდგენთ, როგორც წინააღმდეგობების ჯამს

$$c_1 Z_1 + c_1^2 Z_2' + c_1^2 r_2' \frac{1-s}{s}$$

ეს დაზუსტება გოლდშმიდტის დიაგრამას ანთავისუფლებს ერთ-ერთი ნაკლისაგან, რაც იმაში მდგომარეობს, რომ ცდით მიღებული მოკლედ შერთვის დენი შეესაბამება გოლდშმიდტის წრიული დიაგრამის საფუძვლად დადებული ნახ. 434-ის შენაცვლების სქემით განსაზღვრულ I_{1x} დენს.

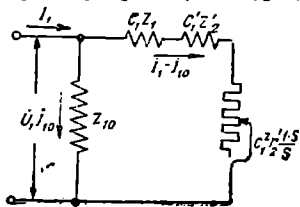


ნახ. 434.

ვ) წრიული დიაგრამის საშუალებით ასინქრონული ძრავის გამოკვლევის სიზუსტის შეფასება. წრიული დიაგრამის ზემოთ განხილული თეორია საშუალებას გვაძლევს მეტად თვალსაჩინოდ შევადგინოთ ასინქრონული მანქანის მუშაობა მის ყოველ რეჟიმში, მხოლოდ წრიული დიაგრამიდან მიღებული შედეგები არასაკმარისი სიზუსტისაა. წრიული დიაგრამის არასიზუსტის ძირითად მიზეზს წარმოადგენს შენაცვლების სქემაში

შენავალი პარამეტრების არამუდმივობა. r_1 და r_2' აქტიური წინააღმდეგობები იცვლება მანქანის დატვირთვის ცვლასთან ერთად, ვინაიდან ადგილი აქვს გრავიტაციის გადახურებას, გარდა ამისა r_2' წინააღმდეგობა იცვლება როტორში f_2 სიხშირის ცვლასთან ერთად, დენის გამოდენის მოვლენის გამო.

ცვლადია აგრეთვე r_{12} აქტიური წინააღმდეგობა და Z_{12} სრული წინააღმდეგობა, ვინაიდან, როგორც ცდა გვიჩვენებს, დანაკარგები რკინაში $m_1 \frac{E_1^2}{Z_{12}^2} r_{12}$ ინდუქციის



ნახ. 435.

კვადრატის ან ე. მ. დ.-ის პროპორციულია მხოლოდ პირველი მიახლოებით.

¹ აქ საჭიროა შევნიშნოთ, რომ წინა შენაცვლებების სქემებში ენტილაციაზე, ხახუნზე და დამატებითი დანაკარგები გათვალისწინებული იყო, როგორც მექანიკური დანაკარგები, ე. ი. როგორც $m_1 I_2^2 \cdot r_2' \frac{1-s}{s_0}$, სადაც s_0 სრიალია უქმი სვლის შემთხვევაში, ხოლო I_2' დენი განისაზღვრება s_0 სრიალისათვის.

x_{12} წინააღმდეგობა საგრძნობლად იცვლება მანქანის გაქვნიის ცვლადობასთან ერთად, რომლის სიდიდე E_1 ე. მ. დ. -ით ხასიათდება: მოკლედ წერტილიდან ($s=1$) უკმ სელაზე ($s=0$) გადასვლის დროს E_1 ე. მ. დ. დაახლოებით ორჯერ იზრდება (ნაწ. IV, § 31) და მასთან შესაბამისად მცირდება x_{12} წინააღმდეგობა. არც ეკვივალენტური სქემა და არც წრიული დიაგრამა ამ ცვლილებებს მხედველობაში არ იღებს.

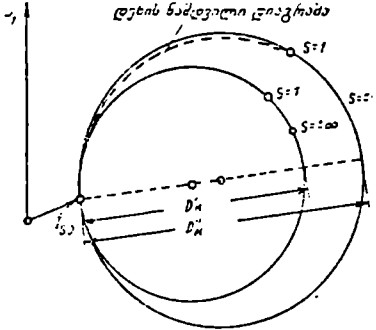
უნდა აღვნიშნოთ, რომ წრიული დიაგრამის სიზუსტეზე დიდ გავლენას ახდენს x_1 და x'_2 წინააღმდეგობების გაქვნიისაგან დამოკიდებულება. ეს დამოკიდებულება განსაკუთრებით დიდ გავლენას ახდენს დახურული და ნახევრად დახურული ღრმულების შემთხვევაში. ღია ღრმულების შემთხვევაში x_1 და x'_2 წინააღმდეგობები შეგვიძლია პრაქტიკულად მუდმივი ჩავთვალოთ.

სტატორის და როტორის გრაგნილებში დიდი დენების შემთხვევაში ადგილი აქვს ფანტვის ნაკადისაგან კბილის თავების დიდ გაქვნიას, რის გამოც x_1 და x'_2 წინააღმდეგობები მცირდება, პირიქით, სინქრონიზმის ახლოს, მცირე დენების შემთხვევაში, ეს წინააღმდეგობები იზრდება. (34,3)-ის თანახმად წრიულ დიაგრამის დიამეტრი

$$D_k = \frac{U_1}{c_1^2 x'_{2k}}$$

მაშასადამე, ძრავის მუშაობის რეჟიმს, მცირე სრიალის შემთხვევაში, როდესაც კბილის თავების გაქვნითა შედარებით მცირეა, შეესაბამება მცირე D'_k დიამეტრი (ნახ. 436) და პირიქით, დიდი სრიალის ზონას დიდი დენების შემთხვევაში შეესაბამება D''_k დიდი დიამეტრი. როგორც ცდები გვიჩვენებს, დახურულ ღრმულებიან მანქა-

ნაში ფარდობა $\frac{D''_k}{D'_k}$ გაცილებით მეტია ერთზე, სტატორზე ღია ღრმულების შემთხვევაში $\frac{D''_k}{D'_k} \approx 1,1$. ამგვარად, დახურულ და ნახევრად დახურულ ღრმულებიან მანქანებში დენის დიაგრამა აღარაა წრებაზი და წარმოადგენს D''_k დიამეტრის წრებაზიდან D'_k დიამეტრის წრებაზზე თანდათანობით გადასვლის ხაზს. ასეთი მანქანების გამოკვლევა საჭიროა ჩავატაროთ მთელი რიგი წრიული დიაგრამების საშუალებით, რომლებიც ავებულება x_2 წინააღმდეგობის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის; უკანასკნელის განსაზღვრა წარმოებს მანქანის გრაგნილში სხვადასხვა დენის შესაბამისად მოკლედ შერთვის მახასიათებლიდან (ნახ. 430).



ნახ. 436. დენის წრიულ დიაგრამაზე x'_2 ცვლილების გავლენა.

გაუღწეოს გარდა წრიული დიაგრამების სიზუსტეზე გავლენას ახდენს აგრეთვე მანქანის მექანიკური დამატებითი დანაკარგების მიხედვითი განსახილველად, აგრეთვე, მაგნიტური არეს უმაღლესი რიგის ჰარმონიკებით შექმნილი უარყოფითი და დადებითი ბრუნვის ნომენტები, რომლებიც ჩვეულებრივ წრიულ დიაგრამაში მხედველობაში არაა მიღებული.

35. მაგნიტური არეს უმაღლესი ჰარმონიკების გავლენა ახინდრონული მანქანის მუშაობაზე

წინა შემთხვევაში ასინქრონული მანქანის მუშაობის პროცესის განხილვის დროს მიღებული გვექონდა, რომ პირველადი გრაგნილის მომქერებზე მოყვანილი ძაბვა და გრაგნილების დენი წარმოადგენს დროის სინუსოიდურ ფუნქციებს. ვგულისხმობდით აგრეთვე, რომ გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალები და მათ მიერ შექმნილი არეები საჭირო ღრეჩოს გასწვრივ განაწილებულია სინუსოიდის წესით. სინამდელიეში ეს პირობა ხშირად დაარღვეული, რადგან ძაბვა, დენი და მაგნიტური არე, გარდა ძირითადი სინუსოიდული ტალღისა, შესაძლებელია შეიცავდეს აგრეთვე უმაღლეს ჰარმონიკებს.

ასინქრონული მანქანის მომქერებზე მოღებული ძაბვის და გრაგნილებში მოქმედი დენის არასინუსოიდურობა საბოლოო ჯამში იწვევს მაგნიტური არეს არასინუსოიდურ ცვლილებას დროის მიხედვით. ამიტომ შემდეგში ჩვენ განვიხილავთ მაგნიტური არეს მხოლოდ უმაღლესი რიგის ჰარმონიკების გავლენას ასინქრონული მანქანის მუშაობაზე.

III ნაწილში ნაჩვენები იყო, რომ მაგნიტურ არეში უმაღლესი რიგის ჰარმონიკების წარმოშობა გამოწვეულია შემდეგი სამი მიზეზით:

- 1) გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალების სივრცეში არასინუსოიდული განაწილებით და მათში გამავალი დენის არასინუსოიდურობით.
- 2) საჭირო ღრეჩოს კბილოვანი ფორმის გამო;
- 3) მანქანის მაგნიტური სისტემის არათანაბარი გაეღნით.

პირველი ორი ფაქტორი წარმოადგენს ძირითადს. მესამე მანქანის მუშაობაზე გაცილებით ნაკლებ გავლენას ახდენს.

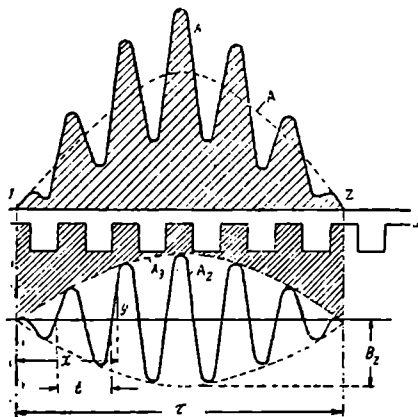
ა) არეს დამამაგნიტებელი ძალით გაპირობებული უმაღლესი ჰარმონიკები. III ნაწილის § 23-ში მოყვანილი იყო დამამაგნიტებელი ძალების დაწერილებათი ჰარმონიკული ანალიზი. დადგენილი იყო, რომ სინუსოიდური დენის შემთხვევაში დამამაგნიტებელი ძალის $\frac{2\tau}{\gamma}$ პერიოდის მქონე უმაღლესი ჰარმონიკული ტალღები საჭირო ღრეჩოს გასწვრივ მოძრაობენ სხვადასხვა მხარეს და სხვადასხვა სიჩქარით $v = \pm \frac{2\tau f}{\gamma}$, სადა f — დენის სიხშირეა.

გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალის ყოველი ჰარმონიკული ტალღა შესაბამის მბრუნავ არეს ქმნის. ანგვარად, ღრმულებში გრაგნილის განაწილების შედეგად მანქანის მბრუნავ მაგნიტურ არეში ძირითადი სივრცული ჰარმონიკის გარდა წარმოიშეება რიგი უმაღლესი ჰარმონიკებისა. თუ ამ დროს

გრაგნილის დენი არასინუსოიდურია, მბრუნავ არეში წარმოიშეება დამატებითი უმაღლესი რიგის ჰარმონიკები $\frac{2\tau}{\gamma}$ პერიოდით, რომელთა სიჩქარე $v_{\text{წ}} = \pm \frac{k}{\gamma} 2\tau f$ შეიძლება ნაკლები, ტოლი ან მეტი აღმოჩნდეს ძირითადი ტალღის სიჩქარეზე.

ბ) საჰაერო ღრეჩოს კბილოვანი აღნავობით გაპირობებული უმაღლესი ჰარმონიკები. დასაწყისში დაუშვათ, რომ სტატორის და როტორის აქვს დახურული ღრმულები, ე. ი. აქვს გლუვი ცილინდრული ზედაპირები. ამ შემთხვევაში გაუელენთავე მანქანისათვის საჰაერო ღრეჩოს გასწორივ ერთი ფაზის დამამაგნიტებელი ძალის ძირითადი ჰარმონიკით გაპირობებული ინდუქციის განაწილება პრაქტიკულად სინუსოიდური იქნება.

თუ როტორი გლუვია, სტატორის კი აქვს ღრმულები ან პირიქით, მაშინ იგივე პირობებში ინდუქციის განაწილების შრუდს ექნება ნახ. 437-ზე წარმოდგენილი კბილოვანი სახე.



ნახ. 437. უმაღლესი რიგის საკბილო ჰარმონიკები.

გამოვყოფთ რა A მრუდიდან ძირითად A_1 ჰარმონიკას, (წყვეტილი) მივიღებთ კბილებით გამოწვეულ არეს A_2 მრუდს.

კბილოვანი A_2 მრუდის მაქსიმუმი ემთხვევა ძირითადი A_1 ტალღის მაქსიმუმს, განაპირა ნულოვანი მნიშვნელობები კი 1 და 2 ნულოვან წერტილებს. A_2 მრუდი წარმოადგენს მოცემული ფაზის გრაგნილის მკვებავი დენის სისშირით მფეთქავ მდგარ ტალღას.

A_2 მრუდის სივრცული პერიოდი ტოლია:

$$t = \frac{\tau}{mq} \quad (35,1)$$

მაშასადამე სივრცულ საკბილო ჰარმონიკას აქვს რიგი

$$v_s = \frac{2\tau}{t} = 2mq = \frac{Z}{p} \quad (35,2)$$

სადაც Z ღრმულთა რიცხვია საჰაერო ღრეჩოს მთელ გარშემოწერილობაზე. ნახ. 437-სათვის $v_s = 12$.

დავუშვათ, რომ A_2 ბრული და მისი შემომავალი A_2 სინუსოიდურია, მაშინ

$$y = B_r \sin \omega t \cdot \sin \frac{\pi}{\tau} x \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} v_r x \quad (35,3)$$

ან ტრიგონომეტრიული გარდაქმნების შემდეგ

$$y = \frac{1}{2} B_r \sin \omega t \cdot \sin \frac{\pi}{\tau} x (v_r - 1) + \frac{1}{2} B_r \sin \omega t \cdot \sin \frac{\pi}{\tau} (v_r + 1)x. \quad (35,4)$$

(35,4) გამოსახულება ვეჩვენებს, რომ ერთი ფაზით შექმნილი კბილური არე A_2 შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ როგორც ორი $\frac{1}{2} B_r$ ტოლი ამპლიტუდის პულსიური სინუსოიდური არეს ჯამი და ის არ იცვლება საპაერო ღრეჩის გარშემოწერილობის გასწვრივ.

ამ არეების სივრცული პერიოდები ტოლია:

$$l' = \frac{\tau}{v_r - 1} = \tau \frac{b}{Z - p} = l \frac{Z}{2(Z - p)}; \quad (35,5)$$

$$l'' = \frac{\tau}{v_r + 1} = \tau \frac{p}{Z + p} = l \frac{Z}{2(Z + p)}. \quad (35,6)$$

და სიხშირეები შესაბამისად $v_r - 1$ და $v_r + 1$ -ს.

განვიხილოთ ეხლა სამფაზა გრავნილით შექმნილი კბილური არე. დავეუშვათ, რომ q -მთელი რიცხვია.

შევკრებთ რა სამივე ფაზის ტოლი სიგრძის ტალღის პულსიურ არეებს (35,4), ნაწ. III, § 24-ის¹ ანალოგიურად მივიღებთ ორ მბრუნავ არეს: პირდაპირი:

$$b_{zbp} = \frac{3}{4} B_r \cos \left[\omega t - \frac{\pi}{\tau} x (v_r + 1) \right]. \quad (35,7)$$

და ინვერსიული

$$b_{rpb} = -\frac{3}{4} B_r \cos \left[\omega t + \frac{\pi}{\tau} x (v_r - 1) \right]. \quad (35,8)$$

თუ კვადრატული ფრჩხილების გამოსახულებას ნელს გავუტოლებთ, მოგნახავთ ამ არეების ბრუნვის სიჩქარეს:

$$v_{rnp} = \frac{2\pi f}{v_r + 1} = 2\pi f \frac{p}{Z + p}; \quad (35,9)$$

$$v_{rpb} = \frac{2\pi f}{v_r - 1} = 2\pi f \frac{p}{Z - p}. \quad (35,10)$$

¹ შეყრების დროს მხედველობაში უნდა გვკონდეს რომ, როდესაც $m=3$ (35,2)-ის თანახმად, v_r წყვილია და 3-ის ჯერადი.

როგორც ამ გამოსახულებებიდან ჩანს პირდაპირი და ინვერსიული კბი-
ლური არეების სიჩქარეები სხვადასხვაა, ამასთან $v_{ნიპ} < v_{ფიპ}$.

წილადური q -ს შემთხვევაში, ედება რა ერთი მეორეზე ცალკეული ფაზე-
ბის კბილური არეები, ნაწილობრივ ურთიერთ აკომპენსირებენ. მხოლოდ
კბილური არეების შემცირების მიზნით ასინქრონულ მანქანებში გრაგნილე-
ბის წილადური q -თი გამოყენება არაა რეკომენდებული, ვინაიდან ასეთ გრაგ-
ნილებში დამამაგნიტებელი ძალის მრუდის ფორმა არასასურველია (ნაწ.
III, § 24).

მაგნიტური არის უმაღლესი ჰარმონიკები, რომლებიც გამოწვეულია სტა-
ტორისა და როტორის დამამაგნიტებელი ძალებით და მათი კბილური ზედაპი-
რებით, როტორის დენზე მოქმედებით ჰქმნის დადებით და უარყოფით მბრუნ
მომენტებს, რომლებიც დაედებიან რა ბრუნვის ძირითად მომენტს, ზოგ შემ-
თხვევაში არსებით გაელენას ახდენენ მანქანის მუშა პროცესზე. მაგნიტური
არეს უმაღლესი ჰარმონიკებით შექმნილი მომენტები შეიძლება დავყოთ ორ
ჯგუფად: 1) ასინქრონული და 2) სინქრონული მომენტები.

გ) მაგნიტური არეს უმაღლესი ჰარმონიკებით შექმნილი ასინქრონული
მომენტები. თუ როტორს აქვს დახურული ღრმელები, მაშინ კბილური არე-
ები იქმნება მხოლოდ სტატორის ღრმელების ხარჯზე.

დავუშვათ, რომ სტატორს აქვს $q=1$, $m=3$ და $p=2$, მაშინ კბილური
არეების რიგი ტოლი იქნება $v_{\pm 1} = 2mq \pm 1 = 7$ და 5.

კბილური არეს მეშვიდე ჰარმონიკა ბრუნავს დადებითი მიმართულებით,
საჩქარით

$$n_7 = \frac{n_1}{7} = \frac{1500}{7} \approx 214 \text{ ბრ/წთ.}$$

მეხუთე რიგის ჰარმონიკა ბრუნავს $n_5 = \frac{1500}{5} = 300$ ბრ/წთ. სიჩქა-

რით საწინააღმდეგო მიმართულებით.

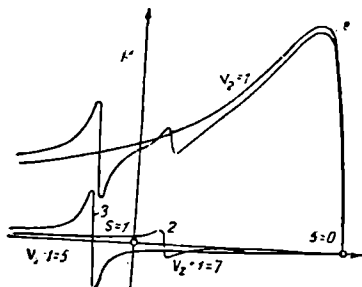
ეს კბილური არეები იკრიბება დამამაგნიტებელი ძალის რეზულტიური
მრუდის მეხუთე და მეშვიდე ჰარმონიკების მიერ შექმნილ შესაბამის არე-
ებთან, რომლებიც იგივე მიმართულებით და იგივე სიჩქარით ბრუნავენ.

არეს უმაღლესი ჰარმონიკები, ურთიერთქმედებენ რა როტორის დენებ-
თან, არეს პირველი ჰარმონიკის მსგავსად ქმნიან მბრუნ მომენტებს. ამ მო-
მენტებს ასინქრონული ეწოდება. ნახ. 438-ზე წარმოდგენილია პირველი,
მეხუთე და მეშვიდე ჰარმონიკების მომენტების მრუდები. როგორც ამ მრუ-
დებიდან ჩანს, როდესაც $n < 215$ ბრ/წთ, მეშვიდე ჰარმონიკის მიერ შექმნილი
მომენტი დადებითია. როდესაც $n_1 = 215$ ბრ/წთ, როტორი ბრუნავს სინქრო-
ნულად მეშვიდე ჰარმონიკის არესთან და არეს მიერ შექმნილი მომენტი ნუ-
ლის ტოლია. როდესაც $n_1 > 215$ ბრ/წთ, არეს მეშვიდე ჰარმონიკისათვის
იწყება გენერატორული რეჟიმი და ბრუნვის მომენტი უარყოფითი ხდება.
მეხუთე რიგის ჰარმონიკისათვის, როდესაც $n_1 > 0$, ძრავი იმყოფება სამუხრუ-
ჟო რეჟიმში, რადგანაც როტორი ბრუნავს არეს საწინააღმდეგოდ, ამიტომ ყველა
 $n_7 > 0$ სიჩქარის დროს მეხუთე ჰარმონიკის არე ქმნის სამუხრუჟო მომენტებს.
არეების უმაღლესი ჰარმონიკების მიერ შექმნილ უარყოფით მომენტებს,

ჯამდებიან რა, შეუძლიათ ზოგიერთ შემთხვევაში მნიშვნელოვნად შეამციროს არეს პირველი ბრუნვის მომენტი.

ნახ. 439-ზე წარმოდგენილია მომენტების მრუდი, რომელშიც მკვეთრად და გამოვლინებული არეების უმაღლესი პარამონიკების უარყოფითი მომენტები.

თუ წინააღმდეგობის მომენტი ტოლია M_c , მაშინ, როგორც მრუდიდან ჩანს, ძრავს შეუძლია მდგრადად მუშაობა სრიალის ორი s_1 და s_2 მნიშვნელობისათვის.



ნახ. 438. ძირითადი პარამონიკის მომენტის

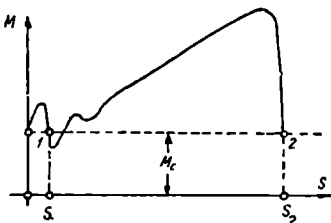
(1) შეკრება ასინქრონულ მებუფე (3) და მეფეიდე (2) პარამონიკების მომენტებთან.

ასეთი ძრავი გაქანების დროს შეიძლება „გაიჩხიროს“ s_1 სრიალზე და ვერ მიაღწიოს 2 წერტილის შესაბამის ნორმალურ ბრუნვის სიჩქარეს.

არეს უმაღლესი პარამონიკების მაგნე მოკმედეების შემცირების მიზნით, რომელიც განსაკუთრებით მკლავნდება მოკლედ ჩართულ ძრავებში მიმართავენ შემდეგ ზომებს: 1) სტატორის გრაგნილის ბიჯის შემოკლება; 2) როტორის ღრმულების დახრა სტატორის ერთ საკბილო დანაყოფზე და 3) სტატორისა და როტორის ღრმულების (კბილების) თანაფარდობის სწორი არჩევა: $0,5 Z_1 < Z_2 < 1,25 Z_1$, ისე-

რომ Z_1 და Z_2 იღება წყვილი და $Z_1 \neq Z_2$.

ღ) ბრუნვის სინქრონული მომენტები. როგორც ზევით იყო ნაჩვენებო ასინქრონული მომენტები წარმოიშევა არეს სტატორის პარამონიკის ურთიერთქმედებით როტორის იმ პარამონიკასთან, რომელიც გამოწვეულია სტატორის ამავე პარამონიკით. მაგრამ შესაძლებელია შემთხვევები, როდესაც როტორის პარამონიკის პოლუსთა რიცხვი იგივეა. რაც სტატორის რომელიმე პარამონიკის პოლუსთა რიცხვი უკანასკნელისაგან დამოუკიდებლად. თუ როტორის ბრუნვის მოცემული სიჩქარის შემთხვევაში ეს არეები სივრცეში ბრუნავენ ზუსტად სინქრონულად, მაშინ მათი ურთიერთქმედება კმნის მუდმივ მომენტს, ისე, როგორც ამას ადგილი აქვს სინქრონულ მანქანაში. თუ როტორის ბრუნვის სიჩქარე შეიცვლება, მაშინ სტატორისა და როტორის არეები დაიწყებენ ერთმანეთის მიმართ გადაადგილებას (სინქრონიზმიდან ამოვარდებიან) და მათი ურთიერთქმედებით გაპირობებული მებრუნე მომენტი დაიწყებს რყევას დადებით და უარყოფით მნიშვნელობებს შორის.



ნახ. 439.

განვიხილოთ ბრუნვის სინქრონული მომენტის შექმნა სტატორისა და როტორის კბილური არეების ურთიერთქმედების მაგალითზე. სტატორისა და როტორის კბილები ჰქმნის შესაბამისად $\frac{Z_1 \pm 1}{p}$ და $\frac{Z_2 \pm 1}{p}$ უმაღლესი რიგის ჰარმონიკებს, ამასთან არეს $\frac{Z_2}{p} + 1$ ჰარმონიკები მოძრაობენ როტორის ბრუნვის მიმართულებით, ხოლო $\frac{Z_2}{p} - 1$ ჰარმონიკები კი საწინააღმდეგო მიმართულებით.

Z_1 და Z_2 -ს შორის შესაძლებელია ისეთი თანაფარდობა, რომლის დროსაც სტატორი და როტორი შექმნის ერთი და იგივე რიგის ჰარმონიკებს, ამასთან $Z_1 \neq Z_2$.

მაგალითად, როდესაც $m_1 = m_2 = 3$, $p = 2$, $Z_1 = 24$ და $Z_2 = 28$ სტატორის ჰარმონიკების რიგია:

$$\frac{24}{2} + 1 = 13 \text{ (პირდაპირი);}$$

$$\frac{24}{2} - 1 = 11 \text{ (ინვერსიული),}$$

ხოლო როტორის ჰარმონიკების რიგია

$$\frac{28}{2} + 1 = 15 \text{ (პირდაპირი);}$$

$$\frac{28}{2} - 1 = 13 \text{ (ინვერსიული).}$$

ამგვარად, როგორც სტატორის, ისე როტორის კბილები ჰქმნის მე-13 ჰარმონიკას; სტატორისათვის ეს ჰარმონიკა პირდაპირია, ხოლო როტორისათვის ინვერსიული.

საერთო ჰარმონიკის არსებობას ყოველთვის ექნება ადგილი, თუ $Z_1 - Z_2 = \pm 2p$.

თუ სტატორის არეს ბრუნვათა რიცხვი წუთში ტოლია n_1 , ხოლო როტორის ბრუნვის სიჩქარე n_2 , მაშინ სტატორის $\frac{Z_1}{p} + 1$ პირდაპირი ჰარმონიკის ბრუნვის სიჩქარე ტოლი იქნება:

$$+ \frac{n_1}{\frac{Z_1}{p} + 1},$$

ხოლო როტორის $\frac{Z_2}{p} - 1$ ინვერსიული ჰარმონიკის ბრუნვის სიჩქარე როტორის მიმართ:

$$- \frac{n_1 - n_2}{\frac{Z_2}{p} - 1},$$

სადაც $n_1 - n_2$ — როტორის დამამაგნიტებელი ძალის ძირითადი ტალღის ბრუნვათა რიცხვია წუთში როტორის ზედაპირის მიმართ.

ვინაიდან როტორი n_2 სიჩქარით ბრუნავს, ამიტომ როტორის $\frac{Z_2}{p} - 1$ ჰარმონიკა სივრცეში ბრუნავს სიჩქარით

$$n_2 - \frac{n_1 - n_2}{\frac{Z_2}{p} - 1}.$$

ცხადია. შესაძლებელია შემთხვევა, როდესაც სტატორის არეს $\frac{Z_2}{p} + 1$

რიგის ჰარმონიკა და როტორის $\frac{Z_2}{p} - 1$ რიგის ჰარმონიკა სივრცეში იბრუნებს ერთი და იგივე სიჩქარით, ე. ი. სინქრონულად.

უმალესი ჰარმონიკების სინქრონული ბრუნვის პირობები განისაზღვრება ტოლობით:

$$\frac{n_1}{\frac{Z_1}{p} + 1} = n_2 \frac{n_1 - n_2}{\frac{Z_2}{p} - 1},$$

საიდანაც

$$n_2 = n_1 \frac{p(Z_1 + Z_2)}{Z_2(Z_1 + p)}. \quad (35,11)$$

განხილულ მაგალითში

$$n_2 = n_1 \frac{2(24 + 28)}{28(24 + 2)} = \frac{n_1}{7}.$$

ამგვარად $\frac{n_1}{7}$ სიჩქარის დროს სტატორისა და როტორის არეს მე-13

რიგის საკბილო ჰარმონიკები სინქრონულად ბრუნავს და მაშასადამე, ერთმეორის მიმართ უძრავია. მოქმედებენ რა ერთიმეორაზე, ეს არეები ჰქმნის ნუღნივ სინქრონულ მომენტს მხოლოდ როტორის $\frac{n_1}{7}$ სიჩქარის დროს.

ნახ. 440-ზე მოყვანილია მიულერის (Müller) მიერ ცდით მიღებული, მომენტების მრუდი, რომლისთვისაც $p_2 = 2$; $Z_1 = 24$ და $Z_2 = 28$.

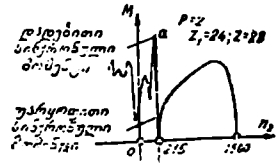
მრუდიდან ჩანს, რომ სინქრონული მომენტების შეკრება არეს ძირითადი ჰარმონიკის ასინქრონულ მომენტთან მკვეთრად ცვლის მანქანის რეზულტიურ მომენტს მისი დადებითი a მნიშვნელობიდან უარყოფით b მნიშვნელობამდე. პირველ შემთხვევაში სტატორის კბილური არეს N პოლუსების როტორის კბილური არეს s პოლუსებზე ურთიერთქმედებით შეიქმნება დადებითი ბრუნვის მომენტი. როტორის ბრუნვის სიჩქარის გაზრდის შემთხვევაში მისი s პოლუსები სტატორის s' , პოლუსების ქვეშ მოდის და ჰქმნის უარყოფით მომენტს (b წერტილი).

განსაკუთრებით მკვეთრად სინქრონული მომენტები შესაძლებელია გამოვლენადეს კბილური არეების არსებობის გამო გაშვების დროს როტორის უძრავი მდებარეობისათვის. ამ მხრივ განსაკუთრებით არახელსაყრელია კბილთა რიცხვის ტოლობა $Z_1 = Z_2$.

სინქრონული მომენტები შესაძლებელია მთლიანად მოსპობილი იქნეს ღრმულების დახრით და სტატორზე და როტორზე ღრმულთა რიცხვის თანაფარდობის სწორი შერჩევით. უსათუოდ უნდა ვერიდოთ $Z_1 = Z_2$ და $Z_1 = -Z_2 \pm 2p$.

საჭიროა აღინიშნოს, რომ ზოგიერთ შემთხვევაში კბილური სინქრონული მომენტები შესაძლებელია გამოვიყენოთ სასარგებლო მუშაობის შესასრულებლად.

მაგალითად, ელექტრული საათებისათვის საჭირო ძრავები აუცილებელია იყოს მცირე ბრუნვათა რიცხვით წუთში. თუ ასეთ ძრავს შევასრულებთ, როგორც ნორმალურს მცირე ბრუნვათა რიცხვზე, მაშინ ის შედარებით დიდი და მძიმეა. თუკი მას შევასრულებთ 300 ბრ/წუთში სტატორისა და როტორის მკვეთრად გამოვლინებული კბილური ჰარმონიკებით, მაშინ ის გაცილებით უფრო მსუბუქია და კბილური არეების არსებობის გამო შეუძლია იმუშაოს შეცვლილებული სინქრონული სიჩქარით.



ნახ. 440. არეების უმაღლესი ჰარმონიკების მომენტებით დამაინჯებული მომენტების მრუდი.

ე) ხმაური ასინქრონული მანქანის მუშაობის დროს. ზოგჯერ ასინქრონული მანქანის მუშაობას თან სდევს საგრძნობი ხმაური. ეს ხმაური შექმნილია მექანიკური და მაგნიტური რყევებით. ის ვრცელდება, როგორც უშუალოდ ჰაერის, ისე იატაკის (საძირკვლის) საშუალებით. ხმაურის მექანიკური მიზეზები დამოკიდებულია უმთავრესად როტორის წონასწორობისაგან, საკისრების მდგომარეობისაგან და არხებში და ქუქრუტანებში გაძაცვივებული ჰაერის რყევისაგან. მცირე სიმაძლავრის მანქანებში ამ მიზეზებით გამოწვეული ხმაური არც ისე დიდია.

უფრო არასასიამოვნოა უმაღლესი ჰარმონიკების არსებობასთან დაკავშირებული მაგნიტური მოვლენებით გამოწვეული ხმაური.

მოხვდება რა ფოლადის ფურცლები და მანქანის ცალკეული ფერომაგნიტური ნაწილები ბგერის სიხშირის ცვალებად მაგნიტურ არეში, იწყებენ რყევას. ეს რყევები იწვევს ხმაურს, რომელიც ხშირად რეზონანსის მოვლენის გამო ძლიერდება. ეს ხმაური ვრცელდება უმთავრესად, იატაკის საშუალებით. სტატორისა და როტორის ღრმულთა რიცხვის არახელსაყრელი თანაფარდობის დროს კბილური არეები იწვევს როტორის რადიალურ მიზიდვას, რომლის მიმართულდება იცვლება როტორის ბრუნვასთან ერთად. გაუწონასწორებელი რადიალური ძალების წარმოშობის შედეგად როტორი და სტატორი განიცდის ვიბრაციას, რომელიც ხმაურის ერთ-ერთ ძირითად მიზეზს წარმოადგენს.

ბნაურის შესუსტება შესაძლებელია მანქანის ელასტიკური დადგმით, თუმცა ბნაურის მოსპობის ყველაზე რადიკალურ საშუალებას წარმოადგენს უმაღლესი პარამონიკების მაგნიტური არეს შესუსტება ყველა იმ საშუალებე-ბით, რომლებიც მოყვანილი იყო მოცეპული პარაგრაფის „გ“ და „დ“ პუნქტებში.

36. ხამშაზა ასინქრონული ძრავების გაშვება

ა) ძრავის გაშვების ზოგადი დახასიათება. ასინქრონული ძრავის გაშვება წარმოადგენს ექსპლოატაციის მეტად დიდი მნიშვნელობის პროცესს. მუშა შექანიზმის სიჩქარე და მდოვრი გადასვლა უძრავი მდგომარეობიდან ნომინალური სიჩქარის თანაბარ ბრუნვათა რიცხვამდე, ხშირი პერიოდული ჩართვების შემთხვევაში არსებით გავლენას ახდენს მბრუნავი შექანიზმის მუშა თვისებებზე.

ზემოთ ნაჩვენები იყო, რომ ძრავის სრული ეკვივალენტური წინააღმდეგობა უძრავი როტორის შემთხვევაში ($s=1$) გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე მოძრავი როტორის ($s<1$); ამიტომ გაშვების ჩვეულებრივად თან სდევს დენის საგრძნობი ბიძგები, რომლებიც იწვევს ქსელის ძაბვის რყევას, ხოლო ხშირი პერიოდული გაშვებების შემთხვევაში დაკავშირებულია აგრეთვე ელექტროენერჯიის საგრძნობ დამატებით ხარჯთან. ასინქრონული ძრავის გამშვები თვისებების შეფასებისა და გაშვების პროცესის ანალიზისათვის შესაძლებელია შემოვილოთ შემდეგი ძირითადი მაჩვენებლები:

1. გამშვი დენის ჯერადობა $K_i = I_n : I_n$.
2. გამშვი დენის ცვლილება დროის მიხედვით: $I_n = f(t)$.
3. ბრუნვის გამშვი მომენტის ჯერადობა $K_u = M_n : M_n$.
4. ძრავის გაქანების სიმდოვრე: $s = \psi(t)$.
5. ძრავის გაქანების ხანგრძლიობა T_n .
6. ენერჯიის დანაკარგები გაქანების დროს A_n .
7. გაშვების სიმარტივე.
8. გამშვი მოწყობილობების ღირებულება.

ასინქრონული ძრავის გამშვი თვისებების შეფასებისათვის მეტად სახა-სიათო მაჩვენებელს წარმოადგენს აგრეთვე ეგრეთწოდებული „ხვედრითი

$$\text{გამშვი მომენტი} \quad m_n = \frac{M_n}{I_n} = \frac{K_u}{K_i}, \quad \text{ე. ფარდობით ერთეულებში}$$

გამშვი მომენტის შეფარდება ერთეულ გამშვი დენთან, ან მისი შებრუნებულ სიდიდე $\frac{1}{m_n} = \frac{k_i}{k_u}$.

ასინქრონული ძრავის გამშვი დენი ტოლია

$$I_n = \frac{U_1}{Z_n}. \quad (36,1)$$

ძრავის წინააღმდეგობა გაშვების მომენტში Z_n წარმოადგენს: მოკლედ

შერთვის Z_k წინააღმდეგობისა და სტატორის გრაგნილის პარამეტრებზე დაყვანილი გაშვების დროს როტორის წრედში ჩართული Z_{Δ} წინააღმდეგობის ჯამს. Z_{Δ} წინააღმდეგობის ჩართვა შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ როტორის გრაგნილის ბოლოები გამოყვანილია საკონტაქტო რგოლებზე.

(36,1)-დან გამომდინარეობს, რომ გამშვი დენის ჯერადობა ტოლია:

$$k_i = \frac{U}{I_n Z_n} \quad (36,2)$$

როგორც ამ გამოსახულებიდან ჩანს, გამშვი დენის k_i ჯერადობა შესაძლებელია შემცირებულ იქნეს U_1 პირველადი ძაბვის დაწევით გაშვების მომენტში, ან გამშვი Z_n წინააღმდეგობის გაზრდით. ორივე ეს საშუალება ხშირადაა გამოყენებული პრაქტიკაში.

(33,9) ტოლობის თანახმად მოკლედ შერთვის წინააღმდეგობა (გეორადი გრაგნილის მხრიდან) ტოლია:

$$Z'_{2k} = Z'_2 + \frac{Z_1}{C_1} \quad (36,3)$$

ამიტომ თუ ჩავთვლით, რომ $Z_{2k} \approx Z'_{2k} = Z_k$, მივიღებთ

$$Z_k = \sqrt{\left(\frac{r_1}{c_1} + r'_2\right)^2 + \left(\frac{x_1}{c_1} + x'_2\right)^2} \quad (36,4)$$

ბრუნვის გამშვი მომენტი ($s=1$) (32,7) და (16,4) განტოლებების თანახმად ტოლია:

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 r'_2}{\omega_1 [(r_1 + c_1 r'_2)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2]} = \frac{m_1 U_1^2 r'_2}{\omega_1 c_1^2 \lambda^2} \quad (36,5)$$

მიღებული გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ M_n მბრუნვი მომენტი შესაძლებელია გაზრდილი იქნეს, თუ ეს საჭიროა, მხოლოდ სამი გზით:

- 1) გაშვების მომენტში პირველადი U_1 ძაბვის გაზრდით;
- 2) ძრავის ინდუქტიური წინააღმდეგობის შემცირებით, მაგალითად, გაშვების საწყის მომენტში სტატორის ან როტორის წრედში ტვეადობის ჩართვით;

3) როტორის წრედის აქტიური r'_2 წინააღმდეგობის გაზრდით ოპტიმალურ მნიშვნელობამდე, რომელიც განსაზღვრულია პირობიდან $\frac{dM_n}{dr'_2} = 0$.

თუ (36,5) გამოსახულებას გავაწარმოებთ r'_2 -ის მიხედვით, მივიღებთ როტორის წრედის საერთო წინააღმდეგობის $r'_2 + r_{\Delta}$ მნიშვნელობას, რომლის დროსაც ბრუნვის გამშვი მომენტი მაქსიმალური სიდიდისაა.

$$r'_2 + r_{\Delta} = \frac{1}{c_1} \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2} \quad (36,6)$$

ბრუნვის გამშვი მომენტის გაზრდის ზემოთ განხილული საშუალებებიდან ყველაზე მეტი გავრცელება პრაქტიკაში მიიღო შესაბამე საშუალებამ.

გადავიდეთ სამფაზა ძრავების გაშვებასთან დაკავშირებული ცალკეული პროცესების უფრო დაწვრილებით განხილვაზე.

ბ) ასინქრონული მანქანის მიერთება ქსელთან. სამფაზა ასინქრონული მანქანის ქსელში ჩართვის პროცესების გამოკვლევისათვის განვიხილოთ სამი ძირითადი შემთხვევა: 1) ჩართვის მომენტში როტორის გრაგნილი გახსნილია, 2) როტორის გრაგნილი მოკლედ შერთულია და როტორი უძრავია და 3) როტორის გრაგნილი მოკლედ შერთულია და როტორი ბრუნავს.

თუმცა ასინქრონული ძრავის ქსელთან მიერთების მომენტში შექმნილი გარდაუვალი რეჟიმები გრძელდება ცვლადი დენის სულ რამდენიმე პერიოდის განმავლობაში, მაგრამ, მაინც აუცილებელია მივიღოთ მხედველობაში წათი ვაგულენა ასინქრონული ძრავების ექსპლოატაციის პირობებში. სამფაზა ასინქრონული მანქანის ქსელთან მიერთების საწყის მომენტში (პირველი შემთხვევა,) როდესაც $t=0$, Φ მაგნიტური ნაკადი საჰაერო ღრეჩოში ნულის ტოლია.

დროის შემდგომი ნებისმიერი მომენტისათვის შესაძლებელია დაიწეროს

$$\Phi = \Phi_y + \Phi_c,$$

სადაც Φ_y —დამყარებული, ხოლო Φ_c —თავისუფალი ნაკადებია.

როდესაც $t=0$, $\Phi=0$ და $\Phi_c = \Phi_{c0} = -\Phi_y = -\Phi_{y0} = -\Phi_{y0} \cdot \Phi_{yr}$ მაგნიტური ნაკადი Φ_{yr} განისაზღვრება ჩართვის მომენტში ($t=0$) მბრუნავი არეს ვექტორის სივრცეში მდებარეობის შესაბამისი β კუთხით. დროის მიხედვით თავისუფალი ნაკადი მცირდება $\Phi_c = -\Phi_{y0} e^{-\alpha t}$ კანონით.

ჩაქრობის კოეფიციენტი α განისაზღვრება მხოლოდ სტატორის წრედის მუდმივებით, ვინაიდან როტორი გახსნილია.

თუ Φ_y მაგნიტურ ნაკადს განვიხილავთ როგორც მბრუნავ დროულ ვექტორს $\Phi_y = \Phi_{y0} e^{j\omega t}$, ხოლო Φ_c ნაკადს, როგორც მიღევად უძრავ დროულ ვექტორს $\Phi_c = -\Phi_{y0} e^{-\alpha t}$ და დროის სხვადასხვა მომენტებისათვის შევკრებთ წათ, მივიღებთ:

$$\Phi_y + \Phi_c = \Phi_{y0} e^{j\omega t} - \Phi_{y0} e^{-\alpha t} = \dot{\Phi}. \quad (36,7)$$

ნახ. 441-ზე წარმოდგენილია $ABCDE$ მრუდი, რომელზედაც სრიალებს $\dot{\Phi}$ ნაკადის ვექტორის ბოლო. $t=0$ -სათვის ეს მრუდი გადადის Φ_y რადიუსიან წრეხაზში. დროული $\dot{\Phi}$ ვექტორის ცვლილების შესაბამისად საჰაერო ღრეჩოში შეიცვლება მაგნიტური არეს მაქსიმალური ინდუქციის ვექტორი.

როგორც ნახ. 441-დან ჩანს, ასინქრონული მანქანის ქსელთან მიერთების მომენტში რეზულტიური მაგნიტური ნაკადის მნიშვნლობამ შეიძლება მიაღწიოს \overline{OB} , რომელიც, თუ მხედველობაში არ მივიღებთ მიღევადობას, ტოლია $2\Phi_{y0}$.

მაგნიტური ნაკადის საგრძნობი ზრდა იწვევს დამაგნიტების დენის ზრდას, რომელიც ამ შემთხვევაში რამდენიმეჯერ მეტი შეიძლება იყოს, ვიდრე უქმი სვლის ნორმალური დენი, ისე, როგორც ამას ადგილი ჰქონდა ტრანსფორმატორის უქმი სვლის ჩართვის შემთხვევაში.

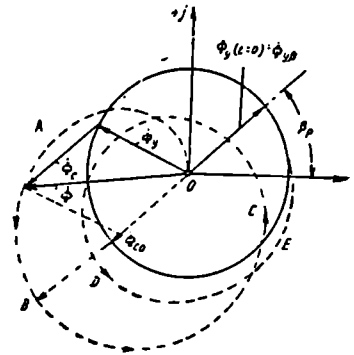
ნახ. 442-ზე ნაჩვენებია ჩართვის დენის ოსცილოგრამა $500 \text{ k}W$; $p=2$

სამფაზა ასინქრონული ძრავის ორი ფაზისათვის, როდესაც როტორი გახსნილია. დენის ბიძგი ამ შემთხვევაში 14-ჯერ მეტია, ვიდრე უქმი სელის დენის ეფექტური მნიშვნელობა და 3-ჯერ მეტი, ვიდრე ნორმალური დენი.

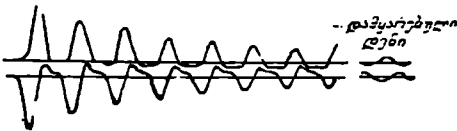
ნარჩი მაგნიტიზმი და მაგნიტურა განვლადობის ცვალებადი მნიშვნელობა (გაელენტა) ასინქრონული მანქანის ჩართვის შემთხვევაში იგივე როლს ასრულებს, როგორც ტრანსფორმატორში. მხოლოდ საპაერო ღრეჩოს გამო ასინქრონულ მანქანაში ნარჩი მაგნიტიზმი და გაელენტის შესაძლებლობა ნაკლებია, ამიტომ დენის ბიძგების ჯერადობა ასინქრონული მანქანის ჩართვის დროს ნაკლებია, ვიდრე ტრანსფორმატორისათვის.

მოკლედ შერთული უძრავი როტორის შემთხვევაში (მეორე შემთხვევა) ჩართვის პროცესი ანალოგიურად მიმდინარეობს. მხოლოდ აქ, ისე, როგორც მოკლედ ჩაქტილი ტრანსფორმატორის შემთხვევაში თავისუფალი ნაკადის მილევა ხდება ჩვეულებრივად უფრო ნელა, ამასთან მილევის α კოეფიციენტი განისაზღვრება არა მარტო სტატორის მუდმივებით, არამედ აგრეთვე როტორის წრედის მუდმივებითაც. დენის ბიძგები ამ შემთხვევაშიც აღწევს ნომინალური დენის მაქსიმუმის $n \approx 10$ -ჯერ მეტ მნიშვნელობას.

ბშირად ასინქრონული ძრავის გაშვების დროს ივისათვის, რომ მივალწიოთ დიდ სიმდოვრეს, სტატორის ძაბვის აწევა მის ნომინალურ მნიშვნელობამდე ხდება ორი-სამი საფეხურით. ასეთი მეთოდით გაშვების დროს ერთი საფეხურიდან მეორეზე გადასელის მომენტში აღვილი აქვს მესამე შემთხვევას, როდესაც სტატორის ქსელთან მიერთება ხდება მოკლედ ჩართული ზოდრავი როტორით.



ნახ. 441. Φ ვექტორის ცვლილება ასინქრონული მანქანის ქსელთან მიერთების დროს.



ნახ. 442.

ამ შემთხვევაში ჩართვის მოვლენების განხილვა ვართულბულია იმ გარემოებით, რომ სივრცეში უძრავი მილევადი თავისუფალი მაგნიტური ნაკადი აინდუქტირებს როტორის გრაგნილში ბრუნვის სიხშირის დენებს. ეს დენები ქმნის მილევად არეს, რომელიც ინდუქტიურად მოქმედებს სტატორზე. დენის ბიძგები ამ შემთხვევაშიაც შესაძლებელია რამდენიმეჯერ (ზოგჯერ 10-მდე) აღემატებოდეს ნომინალური დენის ამპლიტუდას.

ნახ. 443-ზე ნაჩვენებია ჩართვის დენების ოსცილოგრაფები სინქრონულ-

ლად მბრუნავი მოკლედ ჩართული როტორის შემთხვევაში, როდესაც სიმძლავრე $p=15$ კვ.

გ) ძრავის გაქანება გაშვების მომენტში. ძრავის გარბენის პროცესი განისაზღვრება გაშვების პროცესში ძრავის ლილვზე მოქმედი მომენტების დიფერენციალური განტოლებით:

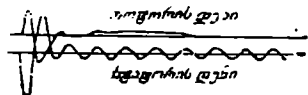
$$M - (M_c + M_0) = J \frac{d\omega_2}{dt} \quad (36,8)$$

აქ M —ასინქრონული ძრავის მიერ განვითარებული ბრუნვის მომენტი, M_c —ლილვზე სასარგებლო დატვირთვის მომენტი, M_0 —ძრავის მექანიკური დანაკარგებით გაპირობებული წინააღმდეგობის მომენტი, J —მბრუნავი მასების ინერციის მომენტი.

ძრავის გაქანების პროცესის გამოკვლევის შემთხვევაში M_0 მომენტს მისი სიმციროს გამო. ჩვეულებრივად უგულებელყოფენ.

ამოცანის ამოხსნა მდგომარეობს იმაში, რომ მოცემული $M = \varphi(\omega_2)$, $M_c = \varphi_1(\omega_2)$ დამოკიდებულებების შემთხვევაში და J ინერციის მომენტის მოცემული მნიშვნელობისათვის, როდესაც აგრეთვე ასინქრონული მანქანის მუდმივები ცნობილია, განვსაზღვროთ გაქანების დრო და დამოკიდებულება $s = \psi(t)$, ან $\omega_2 = \psi_1(t)$.

გარდა ამისა, გაშვების დროის მონაკვეთში საჭიროა სტატორისა და როტორის გრაფილებში ჯოულის დანაკარგების განსაზღვრა. უკანასკნელი მეტად მნიშვნელო-



ნახ. 443.

ვანია თბური რეჟიმის გამოკვლევისათვის იმ ძრავებში, რომელთა გაშვება ხდება ხშირად ან დიდი მქნევარა მასების ქვეშ.

განვიხილოთ დაუტვირთავი და დატვირთული ძრავის გაშვება.

1. დაუტვირთავი ძრავის გაქანება. ამ შემთხვევაში $M_c = 0$.

თუ M_0 უგულებელყოფთ, მაშინ (36,8) განტოლების თანახმად $M = J \frac{d\omega_2}{dt}$ ანდა, მივიღებთ რა მხედველობაში, რომ $\omega_2 = (1-s)\omega_1$, გვექნება

$$M = -J\omega_1 \frac{ds}{dt} \quad (36,9)$$

თუ M -ის ნაცვლად შევიტანთ მის მნიშვნელობას, (32,18)-დან, მივიღებთ

$$M_m \frac{2 + \beta s_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + \beta s_m} = -J\omega_1 \frac{ds}{dt} \quad (36,10)$$

აქედან:

$$T_n = \int_1^{s_1} dt = - \frac{J\omega_1}{M_m} \cdot \frac{1}{2 + \beta s_m} \int_1^{s_1} \left[\left(\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + \beta s_m \right) ds \right], \quad (36,11)$$

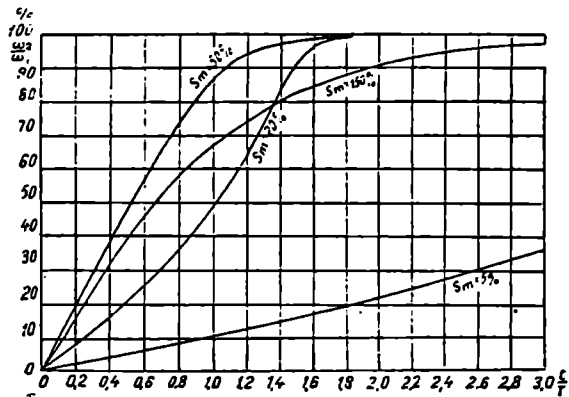
სადაც s_1 სრიალის ის მნიშვნელობაა, სადამდეც ძრავის გაქანება გრძელდება. ინტეგრება გვაძლევს

$$T_n = \frac{J\omega_1}{M_m} \cdot \frac{1}{2 + \beta s_m} \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{1 - s_1^2}{s_m} + (1 - s) \beta s_m + s_m \left| \frac{1}{s_1} \right. \right]. \quad (36,12)$$

სიდიდეს $J\omega_1 : M_m = T$ აქვს დროის განზომილება და წარმოადგენს იმ დროს, რომელიც საჭიროა, რათა უქმი სვლის შემთხვევაში M_m მამბრუნე მომენტის ქვეშ როტორმა განავითაროს სინქრონული სიჩქარე. T -ს გაშვების დროის შექანიკურ მუდმივას უწოდებენ და ჩვეულებრივად არ აღემატება $1 \div 2$ წამს.

თუ (36,12) განტოლებაში T_n და s_1 სიდიდეებს შევცვლით t და s მიმდინარე კოორდინატებით, მაშინ მივიღებთ დაუტვირთავი ძრავის გაქანების განტოლებას:

$$\frac{t}{T} = \frac{1}{2 + \beta s_m} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{1 - s^2}{s_m} + (1 - s) \beta s_m + s_m \left| \frac{1}{s} \right. \right]. \quad (36,13)$$



ნახ. 444. დაუტვირთავი ასინქრონული ძრავის გაქანების მრუდები s_m სრიალის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის.

ნახ. 444-ზე მოყვანილია s_m -ის რამდენიმე მნიშვნელობისათვის (36,13) განტოლების მიხედვით აგებული $\frac{\omega_2}{\omega_1} = 1 - s = \psi \left(\frac{t}{T} \right)$ მრუდები.

როგორც ამ მრუდების განხილვიდან ჩანს, ძრავები ძალზე მცირე s_m -ით (შედარებით. მცირე r_2) და ძალზე დიდი s_m -ით ხასიათდება ძრავის მღოვრე გარბენით. სრიალის ზოგიერთი მნიშვნელობისათვის კი, მაგალითად ნახ. 444-ზე $s_m = 50\%$, გაშვების საწყის მომენტში გვაქვს ბრუნვის სიჩქარის მკვეთრი ზრდა.

თეორიულად სრიალი $s = 0$ მიღწეული იქნება $t = \infty$ დროის შემდეგ. პრაქ-

ტიკულად გაშვება შეიძლება ჩაითვალოს დამთავრებულად, როდესაც $s_1 \approx 10\%$. მაშინ გაქანების დრო ტოლი იქნება

$$T_n = T \frac{1}{2 + \beta s_m} \left[\frac{0.495}{s_m} + 0.9\beta s_m + 2.3 \right]. \quad (36,14)$$

პრაქტიკული გაანგარიშების დროს ჩვეულებრივად J ინერციის მომენტის ნაცვლად ანგარიშში შემოჰყავთ მბრუნავი ნაწილების „შქნევა“ მომენტი“, რონელიც ტოლია:

$$GD^2 = 4gJ, \quad (36,15)$$

სადაც $g = 9.81$ m/sec² სიმძიმის ძალის აჩქარებაა, Gm -ში გამოსახული ინერციის საერთო D დიანეტრამდე მიყვანილი მბრუნავი ნაწილების წონა kG -ში. ამ შემთხვევაში დროის მექანიკური მუდმივა ტოლია

$$T = \frac{GD^2 \omega_1}{4g \cdot M_m} = \frac{GD^2 \cdot n_1^2}{3,65 \cdot 10^5 P_m} \text{ წამში,} \quad (36,16)$$

სადაც P_m ძრავის მაქსიმალური სიმძლავრეა kW -ში.

2. ძრავის გაქანება და ტვირთის ქეცეშ. ამ შემთხვევაში გაქანების განტოლებას აქვს სახე:

$$M - M_c = J \frac{d\omega_2}{dt}. \quad (36,17)$$

როგორც წესი, ამ განტოლების ინტეგრება შეუძლებელია, ვინაიდან $M_c = \varphi_1(\omega_2)$ დამოკიდებულების ანალიზური გამოსახულება არაა ცნობილი. ამ შემთხვევაში მიმართავენ ამოცანის გრაფიკული ხერხით ამოხსნას.

მრუდები $M = \varphi(\omega_2)$ და აგრეთვე $M_c = \varphi_1(\omega_2)$ მოცემულია გრაფიკული სახით, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 445-ზე.

ნახ. 445-ზე ჩანს, რომ ω'_2 სიჩქარე, რომელსაც ძრავი აღწევს გაქანების დროს, განისაზღვრება მრუდების $M = \varphi(\omega_2)$ და $M_c = \varphi_1(\omega_2)$ გადაკვეთის წერტილით. ამ წერტილისათვის $M = M_c$.

(36,17) განტოლებიდან გვაქვს

$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J \cdot d\omega_2}{M - M_c} = \int_0^{\omega_2} T_y \cdot d\omega_2. \quad (36,18)$$

ანგვარად, იმისათვის, რომ ავაგოთ $t = F(\omega_2)$ მრუდი, საჭიროა პირველად ავაგოთ მრუდი

$$T_y = \frac{J}{M - M_c} = \frac{J}{M_y} = F_1(\omega_2), \quad (36,19)$$

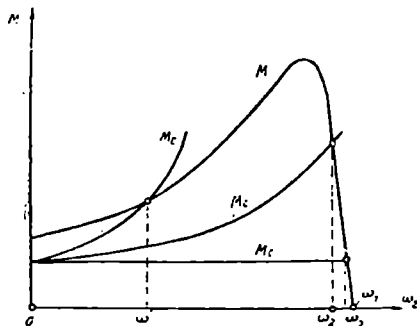
სადაც სხვაობა $M - M_c = M_y$ აჩქარების მომენტის ტოლია. ცხადია, რომ ნებისმიერი წინასწარ არჩეული ω'_2 სიჩქარისათვის t' დრო $T_y = F(\omega_2)$

მრუდის Oab^2 ფართის ტოლი იქნება. ბოლო სიჩქარე, რომელსაც ძრავი მი-
აღწევს გაქანების შედეგად, განისაზღვრება $M = \varphi(\omega_2)$ და $M_c = \varphi_1(\omega_2)$ მრუ-
დების გადაკვეთის წერტილით, როგორც ეს ჩანს ნახ. 446-დან.

უნდა აღვნიშნოთ, რომ ძრავის გაქანების დროზე საგრძნობი გავლენა შეუძლია მოახდინოს მაგნიტური არეს უმაღლესი ჰარმონიკებით შექმნილმა დამუხრუპების მომენტმა.

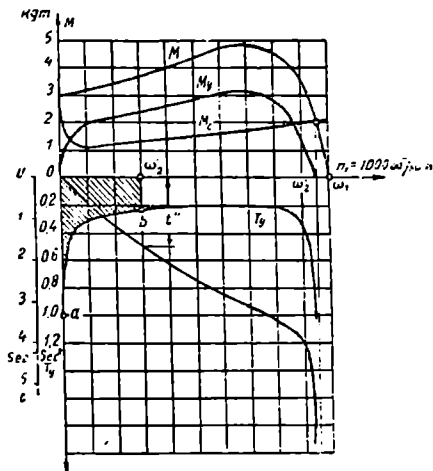
დ) ასინქრონული ძრავის გაშვების პროცესში მოთხოვნილი ენერგია. ძრავის გაშვების დროს მის გრაფიკებში მოქმედი დენები ჩვეულებრივად ბევრად აღემატება ნომინალურს, რაც იწვევს ჯოლის დანაკარგებით გრაფიკის გადახურებას. განსაკუთრებით დიდია ეს გადახურება იმ შემთხვევაში, როდესაც ძრავს უხდება

დიდი მქნევარაქმასების აჩქარება, ან თუ მისი გაშვება ხდება დიდი დატვირთვის M_c მომენტის ქვეშ და ბოლოს, თუ ძრავის გაშვება ხდება ხშირად.



ნახ. 446. გაქანების დროს ძრავის მიერ განვი-
თარებული ბრუნვის სიჩქარის განსაზღვრა.

შივი სიდიდისაა. თუ ძრავის გაშვებიდან t წამის შემდეგ ძრავი მიაღწევს სრიალის s მნიშვნელობას. მაშინ ასეთ დროს ქსელიდან შეიანთქმული ელექტროენერგია ტოლი იქნება



ნახ. 455. დატვირთული ასინქრონული ძრავის
გაქანების მრუდის გრაფიკული აგება.

თუ გაშვების T_n დროსთან, ე. ი. ძრავის გარბენის დროსთან, შედარებით უგულვებელყოფთ მცირე დროს, რომლის განმავლობაშიაც მიმდინარეობს გარდამავალი ელექტრომაგნიტური პროცესი, მაშინ გაშვების პროცესში დახარჯული ენერგიის განსაზღვრა შესაძლებელია მოვხდინოთ დამუარებული რეჟიმის შესაბამისი ეკვივალენტური სქემის საშუალებით (ნახ. 419).

დავუშვათ, რომ ქსელის ძაბვა გაშვების პერიოდში მუდ-
მივით განვიხილოთ. თუ ძრავის გაშვებიდან t წამის შემდეგ ძრავი მიაღწევს სრიალის s მნიშვნელობას. მაშინ ასეთ დროს ქსელიდან შეიანთქმული ელექტროენერგია ტოლი იქნება

$$A_n = m_1 \int_0^t I_{s_0}^2 (r_1 + r_{12}) dt + m_1 \int_0^t \left(\frac{I'_{2k}}{c_1} \right)^2 r'_{2k} c_1^2 dt + m_1 \int_0^t \left(\frac{I'_{2k}}{c_1} \right)^2 I'_{2k} c_1^2 \frac{1-s}{s} dt =$$

$$= A_{n_0} + A_{n_1} + A_{n_2}.$$

ამ განტოლების პირველი ორი ინტეგრალი გამოსახავს ენერგიის ხარჯს თვით ძრავში გაქანების პროცესში. მესამე ინტეგრალი გამოსახავს მბრუნავი მასების აჩქარებაზე დახარჯულ ენერგიას.

პირველი ინტეგრალი $A_{n_0} = I_{s_0}^2 (r_1 + r_{12}) T_n$, A_{n_1} და A_{n_2} განსაზღვრისათვის ვისარგებლოთ ტოლობით

$$M\omega_1 s = m_1 I'_{2k} r'_{2k},$$

საიდანაც მივიღებთ, რომ

$$A_{n_1} = \int_0^t M\omega_1 s \frac{r'_{2k}}{r'_{2k}} dt \quad (36,20)$$

(36,17)-დან გვაქვს

$$dt = \frac{J}{M - M_c} d\omega_2. \quad (36,21)$$

ვინაიდან $s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$, ამიტომ (36,20) და (36,21)-დან მოვნახაეთ

$$A_{n_1} = J \frac{r'_{2k}}{r'_{2k}} \int_0^{\omega_2} \frac{M(\omega_1 - \omega_2)}{M - M_c} d\omega_2. \quad (36,22)$$

ანალოგიურად მივიღებთ:

$$A_{n_2} = J \int_0^{\omega_2} \frac{M\omega_2}{M - M_c} d\omega_2. \quad (36,23)$$

თუ $M = \varphi(\omega_2)$ და $M_c = \varphi_1(\omega_2)$ დამოკიდებულებები ცნობილია, მაშინ A_{n_1} და A_{n_2} ინტეგრალების მოძებნა შესაძლებელია გრაფიკული წესით, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 447-ზე.

კერძო შემთხვევაში, როდესაც გაქანება წარმოებს უქმი სვლის ქვეშ, ე. ი., როდესაც $M_c = 0$ მივიღებთ:

$$A_{n_1} = J \frac{r'_{2k}}{r'_{2k}} \int_0^{\omega_1} (\omega_1 - \omega_2) d\omega_2 = J \frac{r'_{2k}}{r'_{2k}} \left(\omega_1 \omega_2 - \frac{\omega_2^2}{2} \right); \quad (36,24)$$

$$A_{n_2} = J \int_0^{\omega_2} \omega_2 d\omega_2 = J \frac{\omega_2^2}{2}. \quad (36,25)$$

რადგანაც უქმი სვლის დროს $\omega_1 = \omega_2$, ამიტომ Δ_{n1} ენერგიის ხარჯი შესაძლებელია მივიჩნიოთ ტოლი:

$$\Delta_{n1} = J \frac{r_2^2}{r_1^2} \cdot \frac{\omega_1^2}{2} \quad (36,26)$$

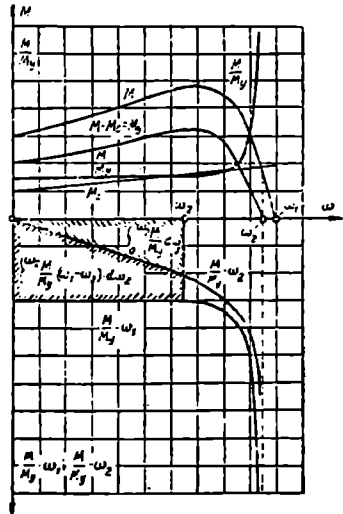
ამ ენერგიის ნაწილი

$$\Delta'_{n1} = J \frac{\omega_1^2}{2}, \quad (36,27)$$

იხარჯება ჯოჯოხის სითბოს სახით როტორის გრაგნილში, ხოლო დანარჩენი ($r_2^2 - r_1^2$)-ის პროპორციული ნაწილი იყარება სტატორის გრაგნილში. (36,25) და (36,27) განტოლებების შედარებიდან გამომდინარეობს, რომ დაუტვირთავი ასინქრონული ძრავის გაქანების დროს როტორზე გადაცემული ენერგიის ნახევარი იხარჯება მის გრაგნილში ჯოჯოხის სითბოზე, ხოლო ნახევარი გადადის როტორის კინეტიკურ ენერგიაში.

ვ) გამშვიდების შემცირება ბირველადი ძაბვის დაწვეით. მოკლედ შერთული როტორიანი ასინქრონული ძრავის უშუალო ჩართვა ქსელის ნომინალურ ძაბვაზე წარმოადგენს გაშვების ყველაზე მარტივ საშუალებას. ასეთი წესი ამჟამად ქსელების სიმძლავრის ზრდასთან დაკავშირებით სულ უფრო ფართო გავრცელებას პოულობს. ვინაიდან მძლავრ ქსელებში გამშვიდების ბიძგები დიდი სიმძლავრის ძრავების შემთხვევაშიც კი ვერ იწვევს ძაბვის საგრძნობ რყევას; ძრავის გაშვებას ქსელის სრულ ძაბვაზე უშუალო ჩართვით ახასიათებს მთელი რიგი ნაკლოვანებებისა, განსაკუთრებით ეს არსებითია მაღალი ძაბვის დიდი სიმძლავრის ძრავებისათვის:

- 1) გამშვიდების შემცირება კმნის საგრძნობი სიდიდის ელექტრომაგნიტურ ძალებს, რომლებიც მოქმედებს გრაგნილის ცალკეულ ნაწილებზე და ცდილობს მათ დეფორმაციას.
- 2) საწყისი მომენტში მოდებული ძაბვის გრაგნილის ვასწვრივ არათანაბარი განაწილების გამო გრაგნილის ხევეთა შორის ადგილი აქვს ზეძაბვებს;
- 3) ხვედრითი m_n გამშვიდების მომენტი ნორმალური ციყვის ბორბლიანი როტორის გამოყენების შემთხვევაში მცირე სიდიდისაა, რაც ახანგრძლივებს ძრავის გაქანებას.

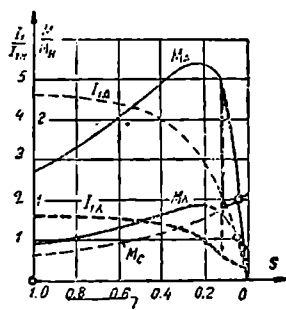
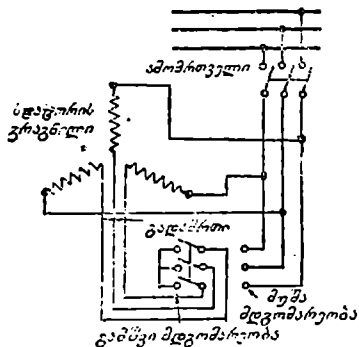


ნახ. 447. ასინქრონული ძრავის გაქანების დროში დაბარჯული ენერგიის განსაზღვრა გრაფიკული მეთოდით.

ამ ნაკლის ნაწილობრივი მოსპობისათვის (პირველი და მეორე) ამჟამად ფართო გავრცელება ჰპოვა შემცირებული ძაბვის ქვეშ მოკლედ შერთული მსინქრონული ძრავების გაშვებამ.

ძაბვის შემცირება ხორციელდება შემდეგი საშუალებებით:

1. სტატორის გრაგნილის სამკუთხედიდან ვარსკვლავზე გადართვა. (ნახ. 448). ამ შემთხვევაში სტატორის გრაგნილი ნორმალურად სამკუთხური შეერთების უნდა იყოს. გაშვების დროს გრაგნილი გადამრთვე-



ნახ. 448.

ლის საშუალებით გადაირთვება ვარსკვლავად, რის გამოც ფაზაზე მოდებული ძაბვა მცირდება $\sqrt{3}$ -ჯერ. ძაბვის გაქანების დამთავრების შემდეგ სტატორის გრაგნილი გადამრთველის საშუალებით ერთდება სამკუთხურად¹. სტატორის დენისა და ბრუნვის მომენტის ცვლილება გაშვებისა და გადართვის პროცესებში ნაჩვენებია ნახ. 448-ზე.

2. დამწვევი ავტოტრანსფორმატორის გამოყენება (ნახ. 449). ჩვეულებრივად ავტოტრანსფორმატორით პირველად ძაბვას ამცირებენ (0,55 : 0,75) U_{1H} -მდე, სადაც U_{1H} პირველადი გრაგნილის ნომინალური ძაბვაა. გაშვებას ახორციელებენ შემდეგი მიმდევრობით: ჩართავენ 3² ზეთის ამომრთველს და რთავენ ძრავს შემცირებულ ძაბვაზე 1 ზეთიანი ამომრთველის ჩართვით. მის შემდეგ რაც ძრავის გაქანება დამთავრებულია, გამორთავენ 3 ზეთიან ამომრთველს და ჩართავენ 2 ზეთიან ამომრთველს. ზეთიანი ამომრთველების სათანადო ბლოკირებით გამორიცხულია მკდარი ჩართვების შესაძლებლობა. ნახ. 449-ზე მოყვანილი გაშვების სქემა წამოყენებული იყო მ. კორნდორფერის მიერ (M. Korndorfer).

¹ არსებობს სპეციალური სქემები, სადაც ვარსკვლავური შეერთებიდან სამკუთხურზე გადართვა ხდება დენის წრედის გათიშვის გარეშე წრედში წინააღმდეგობების შეყვანის საშუალებით.

² ეს სქემა იხნარება დიდი სიმძლავრის ძრავებისათვის, რომელთა ჩართვა შესაძლებელია მხოლოდ ზეთიანი (ან მათი მსგავსი) ამომრთველებით.

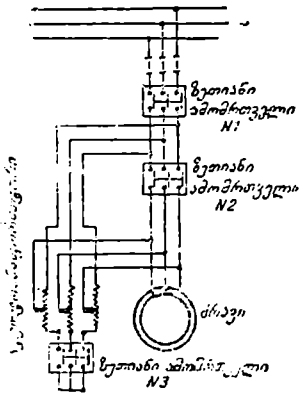
გამშვი ავტოტრანსფორმატორების განსხვავება ნორმალურისაგან მასში მდგომარეობს, რომ ისინი დანიშნულია ხანმოკლე დატვირთვისათვის და ამიტომ ფოლადისა და სპილენძის ხარჯის ეკონომიის მიზნით სრულდება ილი ინდუქციით და დენის სიმკვრივით.

3. გამშვი რეაქტორების გამაყენება (ნახ. 450). ეს რეაქტორები მიმდევრობითაა ჩართული სტატორის გრაგნილთან და ამცირებს პირველად დაბვას ჩვეულებრივად 0,65 U_{1H} -მდე. გაშვების მომენტში პირველად ჩართავენ 1 ზეთიან ამომრთველს, ხოლო ძრავის გაქანების შემდეგ ზეთიან ამომრთველ 2-ს. ორივე ამომრთველს აქვს ბლოკირება.

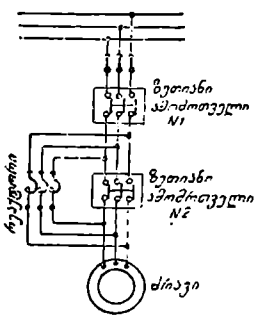
პირველადი დაბვის შემცირებით I_n გამშვი დენის შემცირება მიღწეულია M_n გამშვი მომენტის საგრძნობი შემცირების ხარჯზე.

ეს მოვლენა წარმოადგენს გაშვების ზემოთ განხილული მეთოდების ძირითად ნაკლს.

ეთქვათ, რომ გაშვების დროს დაბვა შემცირებულია α -ჯერ. ვინაიდან α წინააღმდეგობა დაბვის და გამშვი დენის შემცირების დროს ჩვეულებრივად რამდენიმედ იზრდება (ნაწ. IV, § 34), ამიტომ დავუშვათ, რომ α^1 წინააღმდეგობა გაიზარდა β -ჯერ; ასეთ დროს გამშვი დენი ტოლი იქნება:



ნახ. 449.



ნახ. 450.

$$I_n = \frac{U_1}{\alpha \beta z_2}, \quad (36,28)$$

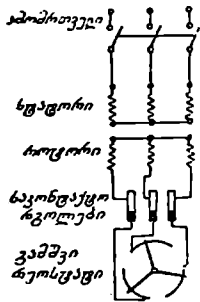
ე. ი. მცირდება $\alpha \beta$ -ჯერ, ხოლო გამშვი მომენტი (36,28)-ის თანახმად შემცირდება $\alpha^2 \beta^2$ -ჯერ. ასე მაგალითად, თუ გაშვება ხდება სამკუთხური შეერთებიდან ვარსკვლავურ შეერთებაზე გადართვით, ფაზური დენი შემცირდება უშუალოდ ჩართვის დენთან შედარებით მეტად, ვიდრე $\sqrt{3}$ -ჯერ (ზუსტად $\beta \sqrt{3}$ -ჯერ), ხაზური დენი და გამშვი მომენტი მცირდება მეტად, ვიდრე 3-ჯერ.

ვინაიდან დაბვის შემცირება გამშვი მომენტის შემცირების გამო საგრძნობლად ზრდის ტვირთის ქვეშ ძრავის გაქანების დროს, ამიტომ ასეთ დროს ზოგჯერ

¹ α , და β , კოეფიციენტები დაბვისაგან პრაქტიკულად დაპოყიდებელია.

ხმარობენ სპეციალურ ცენტრიდანულ გამშვებ ქურობებს, რომლის საშუალებითაც სრულდება მუშა ზეჟანიზმის მდოვრი მიერთება ძრავის ლილვთან, მხოლოდ მას შემდეგ, რაც ძრავმა მიიღწია თითქმის ნორმალურ ბრუნვათარიცხეს. ბოლო დროს ასეთმა ქურობებმა დაჰკარგეს თავისი მნიშვნელობა იმასთან დაკავშირებით, რომ ფართო გავრცელება ჰპოვეს ასინქრონულმა ძრავებმა სპეციალური შესრულების მოკლედ ჩაკეტილი როტორებით (ნაწ. IV, § 36, ხ).

ვ) გამშვი მახასიათებლების გაუმჯობესება როტორის წრედში დამატებითი აქტიური წინააღმდეგობის შეყვანით. ზემოთ აღნიშნული იყო, რომ გაშვების მომენტში როტორის წრედში დამატებითი აქტიური წინააღმდეგობის შეყვანით და ე. მ. დ. და როტორის დენს შორის ძვრის კუთხის ფ, შემცირებით შესაძლებელია ასინქრონული ძრავის გამშვი მახასიათებლების საგრძნობი გაუმჯობესება. მცირდება გამშვი დენის ჯერადობა k_i და იზრდება გამშვი მომენტის ჯერადობა k_m და, მაშასადამე, ხვედრითი გამშვი მომენტი m_n .



ნაბ. 451.

გაშვების მომენტში როტორის წრედის აქტიური წინააღმდეგობის გაზრდა შესაძლებელია განვახორციელოთ ორი გზით:

1) როტორის საკონტაქტო რგოლებზე სპეციალური გამშვი რეოსტატის სახით აქტიური წინააღმდეგობის მიერთებით. (ნაბ. 451), ან 2) როტორის გრაგნილის სპეციალური გადართვების საშუალებით, რომლის დროსაც იზრდება მისი აქტიური წინააღმდეგობა.

ორივე საშუალება განხილული იქნება ქვემოთ.

1. რეოსტატული გაშვება. გაშვების ესწის (ნაბ. 451) მეტად ფართო გავრცელებას პოულობს პრაქტიკაში დიდი სიმძლავრის ძრავებისათვის. ის უზრუნველყოფს კარგი გამშვი მახასიათებლების ქვეშ მდოვრე გაშვებას. მხოლოდ გამშვი რეოსტატი ზრდის ძრავის ღირებულებას და ართულებს მის მოვლას.

გამშვი რეოსტატი შესაძლებელია ისეთნაირად იყოს გათვლილი, რომ ძრავის გაქანების პროცესში მისი გამშვი მომენტი არ დაეცეს განსაზღვრულ სიდიდეზე ქვევით, ან ადგილი არ ექნეს გამშვი დენის გაზრდას მოცემულ სიდიდეზე ზევით.

დაეუშვათ, რომ შერჩეულია M_{max} და M_{min} მნიშვნელობები, რომლის ფარგლებშიაც შესაძლებელია გაშვების პროცესში ბრუნვის მომენტის რყევა. მივიღოთ, რომ $M_n = M_{max}$. როგორც ნაბ. 452-დან ჩანს ამ შემთხვევაში ძრავი გაშვების საწყის მომენტში იმუშავებს მომენტების მე-4 მახასიათებლით.

გაქანების პროცესში s_4 სრიალის შემთხვევაში მომენტი დაეცემა M_{min} -მდე. როტორის ბრუნვის ამ სიჩქარისათვის საჭიროა გამშვი რეოსტატის გადართვა შემდეგ მე-3 საფეხურზე. ძრავი დაიწყებს მუშაობას მე-3 მახასიათებლით.

როდესაც მისი სრიალი დაეცემა s_2 მნიშვნელობამდე, ისევე საჭირო გახდება რეოსტატის გადართვა და ა. შ. ვიდრე გამოთვლილი არ იქნება მთელი წინააღმდეგობა და ძრავი არ გადავა თავის ნორმალურ 0 მახასიათებელზე.

ნახ. 453-ზე ნაჩვენებია იმავე ძრავისათვის გაშვების პროცესში I_2 მეორადი დენის რყევა.

როგორც ნახ. 453-დან ჩანს საფეხურიდან საფეხურზე გადასვლის დროს დენის ბიძგები $I_2 = I_{max} = I_{2n}$.

განვიხილოთ ეხლა, თუ, როგორ ხდება გამშვი რეოსტატის საფეხურების წინააღმდეგობის გათვლა.

ρ -თი აღენიშნოთ შეფარდება: $\frac{r'_2 + r\Delta}{r'_2}$,

სადაც $r\Delta$ — როტორის ფაზაში ჩართული დამატებითი აქტიური წინააღმდეგობაა.

ნახ. 452-დან გამომდინარეობს, რომ s_0, s_1, s_2, s_3, s_4 სრილის დროს რეოსტატის ყველა საფეხურზე მომენტი ერთნაირია და ტოლი M_{min} -ს. ამგვარად (32,7)-ის თანახმად

$$\frac{1}{s_0} = \frac{\rho_1}{s_1} = \frac{\rho_2}{s_2} = \frac{\rho_3}{s_3} = \dots = \frac{\rho_n}{s_n}, \quad (36,29)$$

თუ ზოგად შემთხვევაში ჩავთვლით, რომ რეოსტატს აქვს n საფეხური.

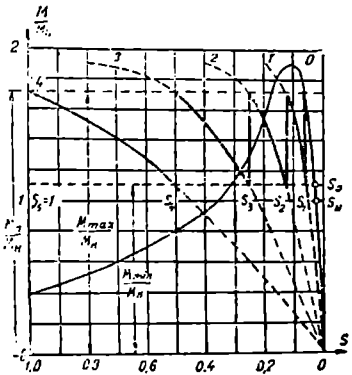
ანალოგიურად ნახ. 453-დან ვღებულობთ, რომ სრილის იგივე მნიშვნელობების შემთხვევაში I_2 დენი ყოველ საფეხურზე ტოლია $I_{2max} = I_{2n}$. ამიტომ (31,18)-ის თანახმად შეგვიძლია დავეწეროთ

$$\frac{1}{s_1} = \frac{\rho_1}{s_2} = \frac{\rho_2}{s_3} = \dots = \frac{\rho_{n-1}}{s_n} = \rho_n. \quad (36,30)$$

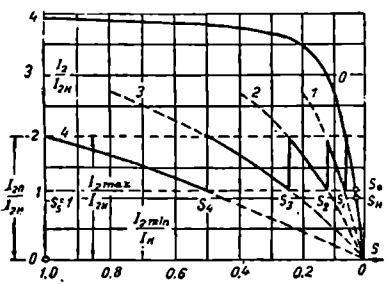
თუ (36,29) და (36,30) ტოლობების ცალკეულ წევრებს ერთიმეორეზე გადავამრავლებთ, მივიღებთ

$$s_2 = \frac{s_1^2}{s_0}; \quad s_3 = \frac{s_1^3}{s_0^2}; \quad \dots; \quad s_n = \frac{s_1^n}{s_0^{n-1}},$$

სადაც n საფეხურის ნომერია.



ნახ. 452. მომენტების მახასიათებლები ასინქრონული ძრავის რეოსტატული გაშვების დროს.



ნახ. 453. მეორადი დენის მახასიათებლები ასინქრონული ძრავის რეოსტატული გაშვების შემთხვევაში.

როგორც ნახ. 452-დან ჩანს, როდესაც $m = n-1$ $s_m = 1$. ამიტომ $s_0 = s_1^{n+1}$, საიდანაც

$$n = \frac{\lg \frac{1}{s_1}}{\lg \frac{s_1}{s_0}} \quad (36,31)$$

ეს ტოლობა საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ რეოსტატის საფეხურთა რიცხვი, რამდენადაც ძრავის ნორმალური 0 მახასიათებლიდან M_{max} , M_{min} , ან I_{2max} და I_{2min} -ის მიხედვით ცნობილია s_0 და s_1 მნიშვნელობები. თუ (36,31) ფორმულა იძლევა წილად რიცხვს, მაშინ მას არგვალევენ უახლოეს დიდ მთელ რიცხვამდე.

(36,29)-დან გამომდინარეობს, რომ

$$f_m = \frac{s_m}{s_0} = \left(\frac{s_1}{s_0} \right)^m \quad (36,32)$$

ეს განტოლება საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ რეოსტატის ნებისმიერი საფეხურის წინააღმდეგობა.

განვიხილოთ მაგალითი. ნახ. 452 და 453-ზე, როდესაც $\frac{I_{2max}}{I_{2H}} = 2$

და $\frac{M_{min}}{M_H} = 1,1$ $s_0 = 0,03$ და $s_1 = 0,06$. (36,31)-ის თანახმად $n = \frac{\lg \frac{100}{6}}{\lg 1,5} \approx 4$.

(36,32)-დან ეპოვობთ: $p_1 = 2$, $p_2 = 4$, $p_3 = 8$, $p_4 = 16$.

მაშასადამე, მთელი რეოსტატის სრული წინააღმდეგობა 15-ჯერ მეტი უნდა იყოს როტორის ფაზის აქტიურ წინააღმდეგობაზე. ძრავის რეოსტატული გაშვების პრაქტიკული თანმიმდევრობა ასეთია:

1. ამოწმებენ, არის თუ არა მუსები რგოლებზე დაშვებული და რამდენად მკიდროა ეს დაშვება.

2. ამოწმებენ, არის თუ არა შეყვანილი როტორის წრედში გამშვიდ რეოსტატის მთელი წინააღმდეგობა.

3. ჩართავენ სტატორის გრაგნილს ქსელში.

4. ძრავის გაქანების ზრდასთან ერთად ახდენენ რა ამპერმეტრზე დაკვირვებას, რეოსტატის წინააღმდეგობა თანდათანობით გამოჰყავთ ისეთნაირად, რომ სტატორის დენმა არ გადააქარბოს დასაშვებ მნიშვნელობას.

5. ძრავის გაქანების დამთავრების შემდეგ მოკლედ კეტავენ საკონტაქტო რგოლებს (ასეთ დროს ჩამკეტი მექანიზმის საშუალებით ხდება საკონტაქტო რგოლებიდან მუსების აწევა, მუსების რგოლებთან ხახუნზე დანაკარგებისა და მათი ცვეთის შემცირების მიზნით).

6. რეოსტატს აყენებენ საწყის მდგომარეობაში, რათა მოაზღაღონ ის შემდეგი გაშვებისთვის.

ძრავის გარბენის ხანგრძლიობა, იმის მიხედვით, თუ რა სიმძლავრის ძრავია და როგორი სიდიდის მბრუნავი მასების ინერციის მომენტთანა გვაქვს საქმე, ირყევა რაზოდენივე წამიდან რაზოდენივე ათეულ წამამდე.

მაღალი ძაბვის ასინქრონული ძრავების რეოსტატული გაშვების შემთხვევაში ზათი ქსელთან მიერთების დროს ცალკეულ ხვევებს შორის შესაძლებელია ისეთივე ზეძაბვები, როგორც მოკლედ შერთული ძრავების ჩართვის დროს.

როტორის წრედში წინააღმდეგობის ჩართვა ამ ზეძაბვებს არ ამცირებს. ცდებმა გვიჩვენეს, რომ ჩართვის მომენტში გრაგნილის პირველ სექციაზე ძაბვის სიდიდემ შესაძლებელია მიაღწიოს ფაზური ძაბვის 100%, და ის არათანაბრადაა განაწილებული სექციის ცალკეულ ხვევებს შორის.

2. უ რ ე ო ს ტ ა ტ ო გა შ ვ ე ბ ა.
ძრავის ურეოსტატო გაშვების შესახებ საპატენტო წინადადებების რიცხვი მეტად დიდია.¹ მხოლოდ ბეერმა მათგანმა პრაქტიკაში ვერ პოვა ვაერცელები სხვადასხვა მიზეზების, უმთავრესად მათი შედარებითი კონსტრუქციული სირთულისა და მაღალი ღირებულების გამო.

რეოსტატის გარეშე როტორის წრედის აქტიური წინააღმდეგობის გაზრდის მაგალითად შესაძლებელია განვიხილოთ „წინააღმდეგობების“ მეთოდი, რომელიც პირველად 1891 წ. წამოყენებული იყო ე. არნოლდის მიერ, ხოლო შემდეგ გ. ვიორგესის და აკად. კ. ი. შენფერის მიერ.

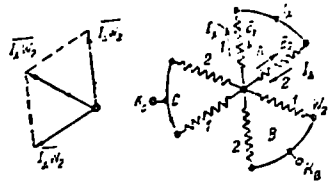
წინააღმდეგობების ერთ-ერთი სქემათაგანი, რომელიც წამოყენებულია ვიორგესის მიერ, ნაჩვენებია ნახ. 454-ზე. ვარსკვლავურად შეერთებული როტორის გრაგნილის ყოველი ფაზა შედგება ორი ერთნაირ სივრცეში 60%-ით დაძრული 1 და 2 ნაწილისაგან. გაშვების მომენტში k_A, k_B, k_C ბოლოები გახსნილია და თითოეული ფაზის შეკრულ წრედში მოქმედებს ე. მ. ძ.-ის გეომეტრიული სხვაობა $\bar{E}_1 - \bar{E}_2$, რომელიც რიცხობრივად $E_1 = E_2$ ე. მ. ძ.-ის ტოლია.

როტორის გამშვიდ დენი ტოლია

$$I_A = \frac{E_1}{2z_3}$$

სადაც $Z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2} - 1$ ან 2 გრაგნილის სრული წინააღმდეგობაა.

როგორც ნახ. 454-დან ჩანს გაშვების მომენტში თითოეული ფაზის და-



ნახ. 454. როტორის გრაგნილის შეერთების სქემა ვიორგესის წინააღმდეგობების მეთოდით.

¹ მკითხველს შეუძლია ამ საკითხის შესახებ დამატებითი ცნობების მიღება ფ. პუნგასა (F. Punga) და ო. რაიტის (O. Raydt) წიგნიდან, რომელიც რუსულ ენაზე გამოსულია 1934 წ. „Централи трифазного тока с реактивной мощностью“

მაზაგნიტებელი ძალის სიერცული ვექტორი ისეთია, თითქოს როტორის ყოველი ფაზის ხვევა რიცხვია ω_2 და დენის ძალა I_A .

ამგვარად, გაშვების მომენტში როტორის გრაგნილი შეგვიძლია განვიხილოთ როგორც სამფაზა გრაგნილი, ყოველ ფაზაში ω_2 ხვევა რიცხვით და $2Z_2$ ფაზური წინააღმდეგობით. სტატორის გრაგნილამდე მიყვანილი როტორის წინააღმდეგობა ტოლი იქნება (ნაწ. 1V, § 28)

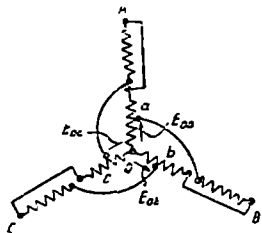
$$r'_2 = 2r_2 \left(\frac{\omega_1 k_{1r}}{\omega_2 k_{2r}} \right)^2.$$

როტორის გრაგნილი მუშა პროცესისათვის, როდესაც k_A , k_B , k_C კონტაქტები ჩაერთილია ცენტრგამზიდი ჩამკეტით, წარმოადგენს სიმეტრიულ ექვსფაზა გრაგნილს. ამ შემთხვევაში სტატორის გრაგნილზე მიყვანილი როტორის ფაზის აქტიური წინააღმდეგობა ტოლი იქნება:

$$r'_{2P} = r_2 \frac{3}{6} \left(\frac{\omega_1 k_{1r}}{\omega_2 k_{2r}} \right)^2.$$

მაშასადამე $r'_{2P} = 4r'_{2P}$ ე. ი. გაშვების სქემისათვის ფაზის მიყვანილი წინააღმდეგობა 4-ჯერ მეტია, ვიდრე ეს წინააღმდეგობა მუშა მდგომარეობისათვის.

ცდა და უფრო ღრმა ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ერთსა და იმავე ღრმულეში მდებარე გრაგნილების (მაგალითად 1A და 2B), ურთიერთ ინდუქციის ე. მ. ძ.-ის გავრცელების გამო, გამშვი სქემიდან მუშა სქე-



ნახ. 455. როტორის გრაგნილის უკუჩართვის სქემა კ. ი. შენფერის მიხედვით.

მაზე გადასვლისას $x_2 \approx \frac{1}{3} x_{2P}$, ამიტომ

$$x'_{2P} \approx 3x_2 \left(\frac{\omega_1 k_{1r}}{\omega_2 k_{2r}} \right)^2,$$

საიდანაც

$$x'_2 = 1,33 x'_{2P}.$$

ამგვარად, გიორგესის სქემის მიმართ შესაძლებელია მივიღეთ შემდეგ დასკვნამდე:

1. სქემა საშუალებას გვაძლევს გაშვების მომენტში როტორის მიყვანილი აქტიური წინააღმდეგობა 4-ჯერ გავზარდოთ, ამასთან მიყვანილი ინდუქტიური წინააღმდეგობა დაახლოებით 1,33-ჯერ.

2. გაშვების სქემისათვის მოკლედ შერთვის სრული წინააღმდეგობა x_2 იზრდება $20 \div 25\%$, ხოლო გამშვები დენი მცირდება $\approx 20\%$ -ით.

3. გამშვი მომენტი, როგორც ცნობილია (36,5) $\frac{r'_2}{z^2_k}$ -ის პროპორციულია და მოცემული სქემისათვის იზრდება $2 \div 2,5$ -ჯერ.

აკად. კ. ი. შენფერმა წამოაყენა მთელი რიგი სქემებისა წინააღმდეგობით.

ბით, რომლებიც უკეთესი მუშა მახასიათებლებით ხასიათდება, ვიდრე გიორგისის სქემები;

შენფერის ერთ-ერთი სქემათაგანი მოყვანილია ნახ. 455-ზე. გაშვების დროს როტორის გრაგნილი ჰქმნის სამ სიმეტრიულ მოკლედ ჩაკეტილ კონტურს, რომლებშიც მოქმედებს E_{0a} , E_{0b} , E_{0c} ე. მ. ძ.-ბი. გაშვების დროს გრაგნილის მუშა ნაწილებს წარმოადგენს, მხოლოდ oa , ob , oc . კონტურების დანარჩენი ნაწილები, როპლის აქტიური წინააღმდეგობა 4-ჯერ მეტია, ხოლო ინდუქტიური წინააღმდეგობა მცირეა „წინააღმდეგობების“ გამო, შესაძლებელია განვიხილოთ, როგორც გამშვი წინააღმდეგობები.

ძრავის გაქანების საწყის პროცესში ცენტრიდანული ჩამრთველები მოკლედ კეტავს a , b , c წერტილებს, ხოლო მის შემდეგ, რაც ძრავი განავითარებს ბრუნვის ნორმალურ სიჩქარეს, მოკლედ იკეტება A , B , C წერტილები რის შემდეგაც გრაგნილების ყველა ნაწილები ერთი მეორისაგან დამოუკიდებლად მოკლედია ჩაკეტილი.

ზ) სპეციალური შეხარულების როტორების გამოყენება ძრავის გამშვი მახასიათებლების გაუმჯობესებათვით. ასინქრონული ძრავის მუშა მახასიათებლების გაუმჯობესებას როტორის აქტიური წინააღმდეგობის გაზრდით და მეორად წრედში ე. მ. ძ.-სა და დენს შორის ძვრის კუთხის შემცირებით შესაძლებელია მივიღწიოთ ციყვის ბორბლიანი მოკლედ შერთული როტორების სპეციალური შესრულებით.

მრავალრიცხოვანი პატენტური წინადადებებიდან პრაქტიკული გავრცელება ჰპოვა ორი ტიპის როტორმა: 1) ღრმა ვიწრო ღრმულებით და 2) ორმაგი ციყვის ბორბლით, რომლებიც უფრო დაწვრილებით განხილული იქნება ქვემოთ.

1. როტორი ღრმა ვიწრო ღრმულთ. ციყვის ბორბალი ამ ტიპის როტორებისათვის ნაჩვენებია ნახ. 366 და 456-ზე. ის პირველად წამოყენებული იყო მ. გობარტის (M. Hobart) მიერ 1912 წ. და დამუშავებული ერთიმეორისაგან დამოუკიდებლად კირშტედტისა და რიუდენბერგის მიერ.

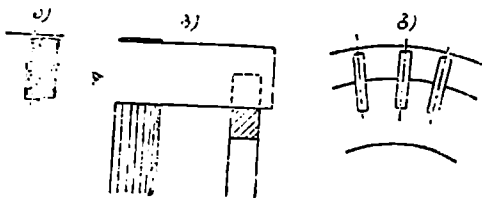
ასეთი კონსტრუქციის იდეა დამყარებულია მასზედ, რომ ღრმულში მდებარე ვიწრო მაღალი გამტარი გაშვების პროცესში, როდესაც როტორის დენის სიხშირე ქსელის სიხშირის ტოლია, გაცილებით უფრო მაღალი აქტიური წინააღმდეგობის და დაბალი L ინდუქტიობის მქონეა, ვიდრე დენის მცირე f_2 სიხშირისა და ნომინალური დატვირთვის შემთხვევაში. როტორის გაქანების პროცესში f_2 სიხშირე მცირდება და როტორის აქტიური წინააღმდეგობა ავტომატურად ეცემა. სიხშირის ზრდით აქტიური წინააღმდეგობის გაზრდა და ინდუქტიობის შემცირება აისხნება ღრმულში მოთავსებულ გამტარში როტორის ფანტვის არეს მიერ აღძრული ფუკოს დენების მოქმედებით.

ნაწ. III, § 25-ში ნაჩვენებია იყო, რომ ღრმულში მდებარე გამტარის აქტიური წინააღმდეგობა ტოლია $r_a = k_n r$, სადაც k_n — ფილდას კოეფიციენტი, ხოლო r გამტარის წინააღმდეგობა მუდმივი დენისათვის. k_n კოეფიციენტი განისაზღვრება (25,9) ფორმულით და დამოკიდებულია ξ სიდიდისაგან,

რომლის რიცხობრივი მნიშვნელობა $f=50$ Hz-ის დროს დაახლოებით ტოლია:

$$\xi = h\sqrt{s}, \quad (36,33)$$

აქ h —გამტარის სინაღლეა ღრმულში cm -ში (ნახ. 456), ხოლო s —სრიალის მნიშვნელობა ფარდობით ერთეულებში. k_n დანოკიდებულება ξ -საგან, როდესაც ღრმულში ერთი გამტარია, ნაჩვენებია მრუდის სახით ნახ. 457-ზე.



ნახ. 456. როტორი ღრმა ღრმულით.

როგორც ამ მრუდიდან ჩანს გაშვების მომენტში ($r=1$), როდესაც $\xi > 2$, $k_n \approx 1/s$; ასე მაგალითად, როდესაც

$h=4$ cm ადგილი აქვს წინააღმდეგობის 4-ჯერ გაზრდას:

$$r_a = 4r.$$

გრიგლური დენების დამამაგნიტებელი მოქმედების გამო მაგნიტური არეს ენერგია ღრმულში მცირდება და მაშასადამე ეცემა გამტარის ინდუქტიობა:

$$L_{\sim} = kLL,$$

სადაც L_{\sim} —ინდუქტიობაა ცვლადი დენის შემთხვევაში, L —ინდუქტიობა მუდმივი დენის დროს, ხოლო $L < 1$.

ფ. ემდეს გამოკვლევების თანახმად ღრმულში ერთი გამტარისათვის:

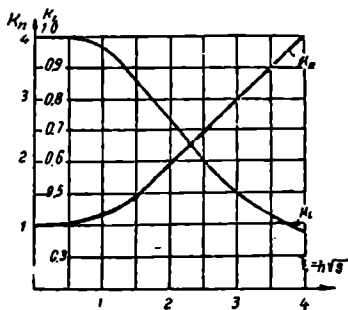
$$kL = \frac{3}{2\xi} \frac{\text{sh} 2\xi - \sin 2\xi}{\text{ch} 2\xi - \cos 2\xi}, \quad (36,34)$$

დანოკიდებულება $kL = f(\xi)$ მოცემულია მრუდის სახით ნახ. 457-ზე. როდესაც $\xi > 2$ შეიძლება ჩავთვალოთ,

$$\text{რომ } kL = \frac{3}{2\xi} = \frac{3}{2h\sqrt{s}} = \frac{3}{2k_n}.$$

როტორის გრიგნილის სრული მიყვანილი წინააღმდეგობა, თუ მხედველობაში მივიღებთ გრიგლური დენების მოქმედებას გრაგნილის აქტიურ ნაწილში, ტოლი იქნება:

$$Z'_2 = (r'_{21} + r'_{2n}k_n) + j(x'_{21} + x'_{2n}kL), \quad (36,35)$$



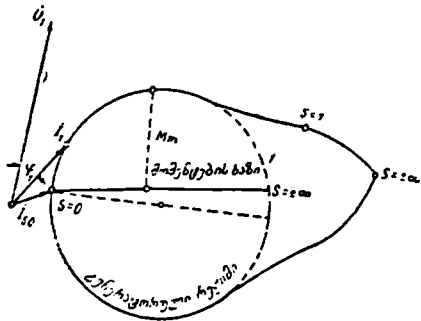
ნახ. 457.

k_n და k'_L კოეფიციენტების მნიშვნელობა ღრმა ღრმულიანი ძრავისათვის.

სადაც ინდექსები n და n შესაბამისად ეკუთვნის ღეროებს ღრმულეებში და შებლურ ჩამკეტ რგოლებს.

(36,35) ტოლობის შესაბამისად ღრმა ღრმულიანი ძრავის ექვივალენტური სქემა ანალოგიური იქნება ნორმალური ძრავის ექვივალენტური სქემის (ნაწ. IV, § 33), მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ ამ შემთხვევაში მეორადი წრედის r'_2 და x'_2 წინააღმდეგობები არ იქნება მუდმივი სიდიდის და შეიცვლება სრიალის ცვლასთან ერთად k_n და k_L კოეფიციენტების ცვლილების შესაბამისად.

ამიტომ ღრმა ღრმულიანი ძრავის დენის დიაგრამა არ წარმოადგენს წრეხაზს, როგორც ეს ჩანს ნახ. 458. მხოლოდ მცირე სრიალის შემთხვევაში, როდესაც $\xi < 1$ და, მაშასადამე (36,33), $s < \frac{1}{h^2}$, დენის დია-



ნახ. 458. ღრმა ღრმულიანი ძრავის დენის დიაგრამა.

გრამა პრაქტიკულად გადადის წრეხაზში, რომლის პარამეტრების განსახლერაც ხდება ჩვეულებრივი წესით, მივიღებთ რა $k_n = k_L = 1$.

ძრავის მუშაობის გამოკვლევისათვის ნომინალური დატვირთვის ფარგლებში შესაძლებელია ვისარგებლოთ 1 წრდიული დიაგრამით. როდესაც

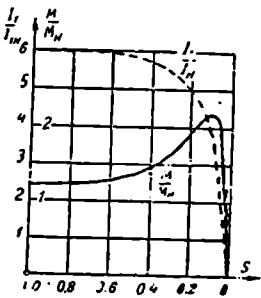
$$s > \frac{1}{h^2} \text{ საჭიროა ანგარიში ჩავატაროთ}$$

ანალიზური გზით შენაცვლების სქემის დახმარებით.

I_1 დენის ძალისა და M მომენტის s სრიალისაგან დამოკიდებულების ტიპური მრუდები ღრმა ღრმულიანი ძრავისათვის ნაჩვენებია ნახ. 459-ზე.

ბოლო დროს ჩვენთან, კავშირში, ძრავებმა ღრმა ღრმულით თითქმის მთლიანად გამოდევნეს წარმოებიდან ძრავები ციყვის ბორბლით მრგვალი კვეთის გამტარებისაგან, და ითვლება მოკლედ შერთული ასინქრონული ძრავების ნორმალურ შესრულებად.

ჩვენი ქარხნების ღრმა ღრმულიანი ძრავებისათვის ჩვეულებრივად $k_n = 1 \div 1,4$ და $k_L = 4,5 \div 6$, მაშინ, როდესაც

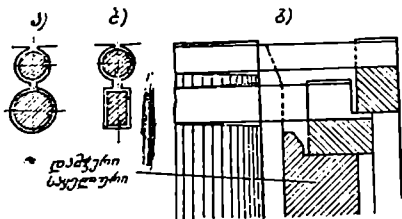


ნახ. 459. ღრმა ღრმულიანი ძრავის $\frac{I_1}{M}$ დენისა და $\frac{M}{M_H}$ ბრუნვის მომენტის მრუდები.

საც მრგვალი კვეთის გამტარებისაგან შესრულებული ციყვის ბორბლიანი ასინქრონული ძრავებისათვის $K_{12}=0,25 \div 0,3$ და $k_1=6 \div 7$. მხოლოდ უნდა აღვნიშნოთ, რომ ღრმა ღრმულიანი ძრავის მუშა მახასიათებლები რამდენიმედ ჩამოუვარდება მრგვალ ღრმულიანი ძრავების მუშა მახასიათებლებს. ღრმულის არასასურველი ფორმის გამო რამდენიმედ იზრდება როტორის ფანტვა, რის შედეგადაც ღრმა ღრმულიანი ძრავისათვის $\cos \varphi_1 2 \div 4\%_0$ -ით, ხოლო მაქსიმალური მომენტი $10 \div 20\%_0$ მცირდება.

მუშა მახასიათებლების მიხედვით ღრმა ღრმულიანი ძრავი თითქმის არ განსხვავდება შესაბამისი ფაზურ როტორიანი ასინქრონული ძრავებისაგან.

2. როტორი ორმაგი ციყვის ბორბლით. ასეთი კონსტრუქციის როტორები პირველად წამოყენებული იყო მ. დოლიგო-დობროვოლსკის მიერ (1893 წ.), მხოლოდ ამ წინადადებას იმ ხანებში არ შეეძლო. ჰქონოდა ფართო გავრცელება. 1898 წელს ბუშერომ უჩვენა, რომ ასინქრონული ძრავის გამშვით მახასიათებლის გაუმჯობესების მიზნით შესაძლებელია როტორების დამზადება რამდენიმე სხვადასხვა წინააღმდეგობის მქონე ციყვის ბორბლით



ფიგ. 460. როტორი ორმაგი ციყვის ბორბლით.

და, რომ პრაქტიკულად საკმარისია დაეკმაყოფილდეთ ორმაგი ციყვის ბორბლიანი როტორით. ძრავებმა ორმაგი ციყვის ბორბლით, რომლებსაც ხშირად ბუშეროს ძრავებს უწოდებენ, შედარებით ფართო გავრცელება ჰპოვეს მხოლოდ უკანასკნელი 10—15 წლის განმავლობაში, მას შემდეგ, რაც შესწავლილი იყო მათი დამზადების რაციონალური მეთოდები.

ორმაგი ციყვის ბორბლის ერთ-ერთი ჩვენს ქარხნებში გავრცელებული კონსტრუქცია ნაჩვენებია ნახ. 460-ზე.

ზედა ციყვის ბორბალი შესრულებულია ჩვეულებრივი ან მარგანცირებული მრგვალი კვეთის თითბერისაგან. ქვედა ბორბალი კი მრგვალი კვეთის (ა) ან ოთხკუთხა (ბ) კვეთის წითელი სპილენძისაგან. ტორსული რგოლები მზადდება სპილენძისაგან:

როგორც ნახ. 460-დან ჩანს, ყოველ ბორბალს, გაშვების პროცესში არათანაბარი გახურების გამო შეუძლია ჰქონდეს დამოუკიდებელი ღერძული გაფართოება. ამავე ღროს მათი ურთიერთ ცენტრირება ხდება დამჭერი საყელურის საშუალებით, რაც გამოირიცხავს მათ რადიალურ ცალმხრივ გადაადგილებას, რომელსაც შეუძლია დაარღვიოს როტორის ბალანსირება.

გაშვების მომენტში, როდესაც $f_2 = f_1$, ქვედა ბორბლის ინდუქტიური წინააღმდეგობა მისი ღრმულში უფრო ღრმა განლაგების გამო გაცილებით მეტია, ვიდრე ზედასი, ამიტომ როტორის გამშვით დენი უმთავრესად ზედა ბორბალში მიმდინარეობს, რომლის აქტიური წინააღმდეგობა შედარებით დი-

ღია (თითბერი). ეს უზრუნველყოფს მაღალ გამშვ მომენტს და გამშვი ღენის ჯერადობის შემცირებას. ძრავის გაქანებასთან ერთად f_2 სიბშირე მცირდება და ადგილი აქვს ზედა დი ქვედა ბორბლებს შორის ღენის თანდათან გადა-
ნაწილებას. მცირე სიმძლავრეების შემთხვევაში, როდესაც გრაგნილების ინ-
დუქტიური წინააღმდეგობა საგრძნობლად მცირეა—ღენების განაწილება
რგოლებში მათი აქტიური წინააღმდეგობების უქუპროპორციულია, ამიტომ
ღენი მოქმედებს უმთავრესად ქვედა რგოლში.

ზემოთ, ასინქრონული მანქანის თეორიის განხილვის დროს, როდესაც
მის როტორზე მოთავსებულია ერთი გრაგნილი, ჩვენ მბრუნავ ასინქრონულ
მანქანას ვიხილავდით როგორც ორგრაგნილიან ტრანსფორმატორს უძრავი
გრაგნილებით. ამიტომ ბუნებრივია როტორზე ორმაგი გრაგნილით მბრუნავი
ასინქრონული მანქანის თეორია დაიყვანოთ სამგრაგნილიანი ტრანსფორმა-
ტორის თეორიამდე. ასეთ დროს ადვილად გამოითვლება გრაგნილებს შორის
ყველა ინდუქტიური კავშირი.

ნაწ. II, § 12-ში მოცემული იყო სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის
ძაბვებისა და ღენების მიყვანილ მნიშვნელობებს შორის შემდეგი შეფარ-
დებები:

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_2 = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 Z_2; \quad (36,36)$$

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_3 = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_3 Z_3. \quad (36,37)$$

თუ ამ ტოლობიდან გამოერიცხავთ ღენს $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 - \dot{I}_3$, მივიღებთ

$$-(\dot{U}_1 + \dot{U}_2) = \dot{I}_2 Z_{k12} + \dot{I}_3 Z_{k13}; \quad (36,38)$$

$$-(\dot{U}_1 + \dot{U}_3) = \dot{I}_2 Z_{k12} + \dot{I}_3 Z_{k13}; \quad (36,39)$$

სადაც $Z_1 + Z_2 = Z_{k12}$ და $Z_1 + Z_3 = Z_{k13}$. (36,38) და (36,39) ტოლობები
გამოყვანილია იმ დაშვებიდან, რომ სამივე გრაგნილების დამამაგნიტებელი
ძალების ჯამი ნულის ტოლია. დამაგნიტების ღენის უგულვებელყოფა ასინ-
ქრონულ ძრავებში ნაკლებად მისაღებია და, ამიტომ ვიგულისხმობთ, რომ
 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = \dot{I}_0$. ასეთი დაზუსტების შემდეგ (36,38) და (36,39) განტოლებების
მარჯვენა მხარეში საჭიროა პირველად გრაგნილში I_0 ღენით გამოწვეული
ძაბვების ვარდნის შესაბამისი წევრების დამატება:

$$-(\dot{U}_1 + \dot{U}_2) = \dot{I}_2 Z_{k12} + \dot{I}_3 Z_{k13} - \dot{I}_0 Z_{k1(2)}; \quad (36,40)$$

$$-(\dot{U}_1 + \dot{U}_3) = \dot{I}_2 Z_{k12} + \dot{I}_3 Z_{k13} - \dot{I}_0 Z_{k1(3)}. \quad (36,41)$$

აქ $Z_{k1(2)}$ წარმოადგენს პირველადი გრაგნილის სრულ წინააღმდეგობას,
როდესაც, მხოლოდ პირველად და მეორად გრაგნილებში მოქმედებს ღენები
ერთმანეთის შემხვედრად $Z_{k1(2)} = r_1 + j\omega_1(L_{11} - M_{12})$, ხოლო $Z_{k1(3)}$ უღრის
იგივე წინააღმდეგობას, თუ ღენები მოქმედებს მხოლოდ 1 და 3 გრაგნილებში:

$$Z_{k1(3)} = r_1 + j\omega_1(L_{11} - M_{13}).$$

ნახ. 420-დან გამომდინარეობს, რომ ასინქრონული ძრავისათვის:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 \frac{1-s}{s}; \quad (36,42)$$

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_3 r_3 \frac{1-s}{s}. \quad (36,43)$$

(36,40) და (36,41) განტოლებების ერთდროული ამოხსნით, თუ მივიღებთ, რომ $\dot{I}_0 Z_{k1(2)} \approx \dot{I}_0 Z_{k1(3)}$, გვექნება:

$$\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_3} = \frac{Z_{k13} - Z_1 + r_3 \frac{1-s}{s}}{Z_{k12} - Z_1 + r_2 \frac{1-s}{s}} = \frac{r_3 \frac{1}{s} + jx_3}{r_2 \frac{1}{s} + jx_2} \quad (36,44)$$

ვინაიდან $Z_{k13} - Z_1 = Z_3$ და $Z_{k12} - Z_1 = Z_2$,

მიღებული (36,44) ტოლობა განსაზღვრავს მიყვანილი დენების შეფარდებას როტორის ბორბლებში.¹

განვიხილოთ, თუ, როგორ შეიძლება x_2 და x_3 წინააღმდეგობების ანალიზური გზით განსაზღვრა.

სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორისათვის მიღებული გვექონდა, რომ

$$x_2 = \frac{1}{2} (x_{k12} + x_{k23} - x_{k13}); \quad (36,45)$$

$$x_3 = \frac{1}{2} (x_{k13} + x_{k23} - x_{k12}). \quad (36,46)$$

სამივე ინდუქტიური წინააღმდეგობები x_{k12} , x_{k13} , x_{k23} განისაზღვრება ნახ. 461-ის, შესაბამისად ჩვეულებრივი მეთოდებით (ნაწ. III, § 25) იმ პირობით, რომ ყოველი წყვილი გრაგნილის დამამაგნიტებელი ძალები გაწონასწორებულია.

ანგარიშის დროს აუცილებელია მხედველობაში მივიღოთ ღრმულებში, გრაგნილის შუბლურ ნაწილებში და საჰაერო ღრეჩოებში ფანტეის არეები, და აგრეთვე kL კოეფიციენტი (36,34), რომლის სიდიდეც როტორის მრგვალი კვეთის გამტარებისათვის განისაზღვრება ნახ. 457-ის თანახმად, თუ მივიღებთ, რომ $k=d$.

(36,40)–(36,41) განტოლებებს შეესაბამება ნახ. 462-ზე მოყვანილი შენაცვლების სქემა, რომელიც წარმოადგენს ძრავის შენაცვლების სქემას ორმაგი დამოუკიდებელი ბორბლით როტორზე.

ამ სქემაში მიღებულია, რომ $Z_{k1(2)} \approx Z_{k1(3)} = Z_{k1} = r_1 + jx_1$. სინქრონიზმის

¹ (36,44) ტოლობა სამართლიანია როტორის 2 და 3 გრაგნილების ნებისმიერი ურთიერთგანლაგებისათვის. ისინი შესაძლებელია განლაგებული იყოს სხვადასხვა ღრმულებშიაც კი.

დროს ($s=0$) ორივე მეორადი კონტურები გახსნილია ($I_2=I_3=0$) და დენი

$$I_0 = I_0 = \frac{\dot{U}}{Z_{k12} + Z_{l2}}$$

შენაცვლების სქემის თანახმად 2 და 3 ბორბლებით განვითარებული ბრუნვის მომენტები ტოლია

$$M_2 = m_1 I_0^2 r_2 \frac{1}{s \omega_1}; \quad (36,47)$$

$$M_3 = m_1 I_0^2 r_3 \frac{1}{s \omega_1}, \quad (36,48)$$

თუ მხედველობაში მივიღებთ (36,44), მოენახავთ ორივე ბორბლების მომენტების შეფარდებას:

$$\frac{M_2}{M_3} = \frac{I_2^2 r_2}{I_3^2 r_3} = \frac{r_2 \left(\frac{r_3^2}{s^2} + x_3^2 \right)}{r_3 \left(\frac{r_2^2}{s^2} + x_2^2 \right)}. \quad (36,49)$$

სრული ბრუნვის მომენტი ტოლია:

$$M = M_2 = M_3 = m_1 (I_1^2 r_2 + I_3^2 r_3) \cdot \frac{1}{s \omega_1}. \quad (36,50)$$

ნახ. 463-ზე ნაჩვენებია როტორის ზედა და ქვედა ბორბლის დენებისა და მომენტების შეფარდებების დამოკიდებულება s , სრილისაგან, როდესაც ზედა ბორბლის აქტიური წინააღმდეგობა საგრძნობლად დიდია.

როგორც (36,44) და (36,49) განტოლებებიდან ჩანს, როდესაც $s=1$,

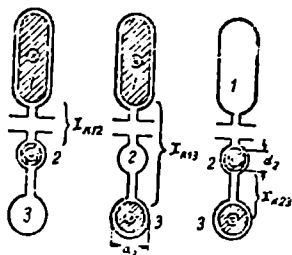
$$\frac{I_2}{I_3} = j \frac{x_2}{r_3}; \quad \frac{M_2}{M_3} = -\frac{x_2^2}{r_3 r_2}$$

ამგვარად, გაშვების პირველ მომენტში I_2 დენი დაახლოებით 90° -ით უსწრებს I_3 დენს.

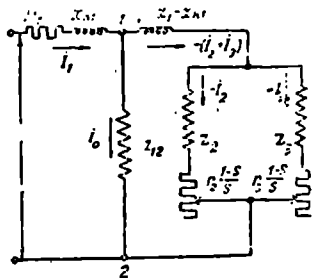
სინქრონიზმის ახლოს ($s=0$) გვექნება

$$\frac{I_2}{I_3} \approx \frac{r_2}{r_3}; \quad \frac{M_2}{M_3} \approx \frac{r_1}{r_2}$$

შაიდანაც გამომდინარეობს, რომ I_2 და I_3 დენები ფაზით ემთხვევა და გა-



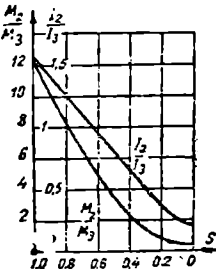
ნახ. 461. სტატორის გრაგნილში და როტორის ბორბლებში დენების განაწილება x_{k11} , x_{k12} , x_{k22} ინდუქტიური წინააღმდეგობების განსაზღვრის შემთხვევაში.



ნახ. 462. ასინქრონული ძრავის შენაყვლების სქემა ორნაჯი ციყვის ბორბლის შემთხვევაში.

თი შეფარდება, ისევე, როგორც მომენტების შეფარდება, ბორბლის აქტიურ წინააღმდეგობების შეფარდების უკუპროპორციულია.

იმის გამო, რომ შენაცვლების სქემა (ნახ. 465) შეიცავს ორ მეორად შტოს ცვალებადი წინააღმდეგობებზე I_1 დენის ძალის დიაგრამა არ წარმოადგენს წრეხაზს.



ნახ. 463. ზედა და ქვედა ციყვის ბორბლებში დენებისა და მომენტების შეფარდებების დამოკიდებულება სრიალისაგან.

შეიძლება დავამტყიცოთ, რომ ორმაგი ციყვის ბორბლიანი ძრავის დენების დიაგრამა საკმარისი სიზუსტით წარმოადგენს ორი წრეხაზის შეთავსებას, სადაც ერთი მათგანი შეესაბამება $s \geq 1$ რეჟიმებს, ხოლო მეორე ნორმალურ დატვირთვებს.

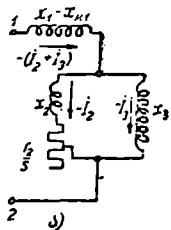
როდესაც $s \geq 1$ შესაძლებელია სრულიად უგულვებლევით $\frac{I_2}{s}$ წინააღმდეგობა x_3 -თან შედარებით-

ამ შემთხვევაში ძრავის მეორადი წრედების შენაცვლების სქემა მიიღებს ნახ. 464, ა-ზე ნაჩვენებ სახეს. ეს სქემა ნაწ. IV § 33-ის თანახმად შესაძლებელია გარდაიქმნეს ნახ. 464, ბ-ზე მოცემულ შენაცვლების სქე-

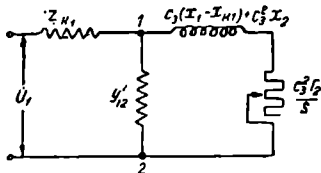
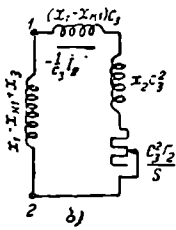
მაში, სადაც $c_3 = 1 + \frac{x_1 - x_{k1}}{x_3}$ წარმოადგენს ერთისა-

გან განსხვავებულ არს რიცხვს.

თუ ნახ. 462-ის შენაცვლების სქემის მარჯვენა მხარეს შევცვლით ნახ. 464, ბ-ს ექვივალენტური სქემით და შემოვიღებთ 1 და 2 დენებს შორის ორპარალელურად ჩართულ წინააღმდეგობებისათვის საერთო გამტარობას



ნახ. 464.



ნახ. 465.

$$y'_{12} = \frac{1}{Z_{12}} + \frac{1}{X_1 - X_{k1} + X_3}$$

მივიღებთ ძრავის ნახ. 465-ზე წარმოდგენილ შენაცვლების სქემას $s \geq 1$ რეჟიმებისათვის.

ეს შენაცვლების სქემა არაფრით არ განსხვავდება ასინქრონული ძრავის ნორმალური შენაცვლების სქემისაგან, გარდა იმისა, რომ y'_{12} გამტარობა წარმოადგენს შედარებით დიდ სიდიდეს ($y'_{12} \gg y_{12}$). ასეთ პირობებისათვის დენის k_1 წრთული დიაგრამა, რომელიც შეესაბამება ნახ. 465-ის შენაცვ-

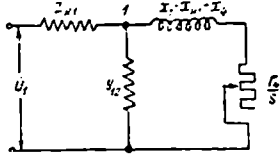
ლების სქემას, ლებულობს ნახ. 467-ზე ნაჩვენებ სახეს. ის შესაძლებელია აგებული იქნას ნაწ. IV, § 34-ში განხილული ცნობილი მეთოდით.

ნორმალური დატვირთვის ფარგლებში ყოველთვის $s < 0,1$, ამიტომ x_2 წინააღმდეგობა შესაძლებელია უგულვებელყოთ $\frac{r_2}{s}$ წინააღმდეგობასთან შედარებით. ასეთი დაშვების შედეგად ნახ. 462-ის შენაცვლების სქემის ორი მეორადი პარალელური შტოების ჯამური წინააღმდეგობა ტოლი იქნება.¹

$$\frac{\frac{r_2}{s} \left(\frac{r_3}{s} + jx_3 \right)}{\frac{r_2+r_3}{s} + jx_3} \approx \frac{1}{s} \cdot \frac{r_2 r_3}{r_2+r_3} + jx_3 \frac{r_2^2}{(r_2+r_3)^2} = \frac{r_4}{s} + jx_4.$$

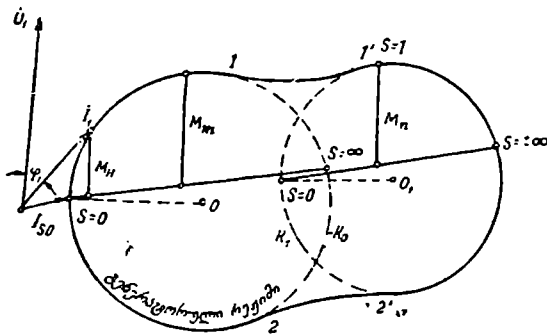
შენაცვლების სქემა მიიღებს ნახ. 466-ზე წარმოდგენილ სახეს.

ამ შენაცვლების სქემას შეესაბამება ნახ. 467-ზე I_1 დენის დიაგრამა, K_0 წრეხაზის სახით. ეს წრეხაზი შესაძლებელია აგებული იქნას საერთო მეთოდით (ნაწ. IV, § 34). მისი საშუალებით შესაძლებელია ჩვეულებრივი წესით ავაგოთ ძრავის მუშა მრუდები.



ნახ. 466.

ძრავის I_1 დენის ნამდვილი დიაგრამა ორმაგი ციყვის ბორბლის შემთხვევაში წარმოადგენს ორი k_0 და k_1 წრეხაზის შეთავსებას (ნახ. 467). გარდამავალი მრუდები 1—1' და 2—2' მათი მდოვრი ფორმის გამო ადვილი ასაგებია ერთი-ორი შუალედი წერტილების დახმარე-



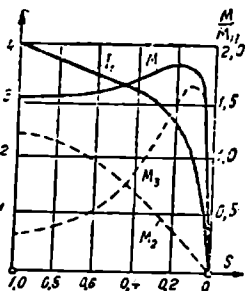
ნახ. 467. ორმაგი ციყვის ბორბლიანი ძრავის დენის დიაგრამა.

ბით, რომელთა მდებარეობაც გამოითვლება ნახ. 462-ის შენაცვლების სქემიდან.

¹ გარდაქმნის დროს უგულვებელყოფით წევრებს, რომლებიც s^2 ნაპრავლს შეიცავს.

სასურველი გამშვით და მუშა მახასიათებლების მიღებას ძრავის დაგეგმვა-რების დროს შესაძლებელია მივალწიოთ ქვედა ბორბლის ინდუქტიური წინა-აღმდეგობის ცვალებადობით, ანდა ციყვის ბორბლების აქტიური წინააღმდე-გობების სათანადო შერჩევით. პირველ პარამეტრზე მოქმედება შესაძლებე-ლია ციყვის ბორბლებს შორის მოთავსებული საპერო ნაქვრეტის სიმაღლისა და სივანის ცვლით.

საქიროა მხოლოდ შევნიშნოთ, რომ გამშვით მახასიათებლების გაუმჯო-ბესებას ყოველთვის თანსდევს მუშა მახასიათებლების ცოტაოდენი გაუარესე-ბა. ძრავი ორმაგი ციყვის ბორბლით კონსტრუქციისა და შესრულების



ნახ. 468. M_1, M_2, M_3 ბრუნვის მომენტები და I_1 დენის დამოკი-დებულება სრიალისაგან.

თვალსაზრისით რამდენიმედ უფრო რთულია, ვიდრე ღრმა ღრმულიანი ძრავი, ამიტომ ისინი გავრცელებას პოულობენ უმთავრესად იმ შეკითხვევაში, როდესაც გამშვით მახასია-თებლებს წაეყენება გაზრდილი მოთხოვნი-ლებები, მაგალითად, დიდი სტატიკური და დინამიკური წინააღმდეგობათა მომენტის მქონე მექანიზმის ბრუნვის დროს (სამსხერე-ველები, კონვეიერები, დგუშიანი კომპრესო-რები, ცენტროფუგები, ბურთულეებიანი წის-ქვილები და სხვ.).

ნახ. 468-ზე მოყვანილია ორმაგი ციყ-ვის ბორბლიანი ძრავის M ჯამური მომენ-ტის ქვედა და ზედა ბორბლის M_2 და M_3 მომენტებისა და I_1 დენის სრიალისაგან დამოკიდებულების ტიპიური მრუდები.

ცხრ. 23-ში მოყვანილია K_{Σ} და K_i მნიშვნელობები ქარხანა „ელექტრო-სილას“ მონაცემების თანახმად ორმაგა და უბრალო ბორბლით სხვადასხვა შესრულების ასინქრონული ძრავებისათვის.

ცხრ. 24-ში მოცემულია სამი სამფაზა ასინქრონული ძრავის მუშა და გამშვით მახასიათებლების შედარება, როდესაც მათი სტატორები ერთი და იგივეა, ხოლო როტორები სხვადასხვა შესრულებისაა: უბრალო ციყვის ბორბლით, ორმაგი ციყვის ბორბლით და ღრმა ღრმულით.

ცხრილი 23

	ძრავი ორმაგი ბორბლით			ძრავი ერთი ბორბლით
	2,0	1,5	1,0	0,3
$k_m = \frac{M_n}{M_{II}}$				
$k_i = \frac{I_{1n}}{I_{1II}}$	5 ÷ 4,5	3,8 ÷ 3,5	3,5 ÷ 3,2	6 ÷ 7

ძრავის მონაცემებია: $P = 15 \text{ kW}$; 380 V , $1500 \text{ ბრ/წუთ. } 50 \text{ H}_\bullet$.

როგორც ამ ცხრილიდან ჩანს, ძრავებში მუშა მახასიათებლების გაუმ-ჯობესება როტორების სპეციალური შესრულებით მიღწეულია ნორმალური

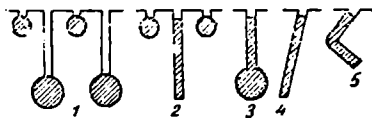
დატვირთვის დროს სიმძლავრის კოეფიციენტის შემცირებისა და მ. კ. კ-ის მცირეოდენი შემცირების ხარჯზე.

ცხრილი 24.

როტორის ტიპი	$\eta\%$	$\cos \varphi_1$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{I_{1n}}{I_{1n}}$	m_n
1. უბრალო ბორბალი მრგვალი კვეთის ღეროებით .	90,7	0,925	1,03	6,26	0,165
2. ორმაგი ბორბალი .	89,6	0,85	2,24	3,91	0,573
3. ღრმა ღრმული .	89,7	0,86	1,45	3,97	0,365

სპეციალური შესრულების როტორებში ციყვის ბორბლების შესრულების მრავალი საპატენტო წინადადება არსებობს.

ნახ. 469-ზე და ნაწ. IV, § 26, მოყვანილია ამ წინადადებების ნაწილი.



ნახ. 469. ციყვის ბორბლების შესრულების სხვადასხვა საშუალებები.

37. სამფაზა ასინქრონული ძრავის ბრუნვის ხიჩქარის რეგულირება და დამუხრუჭება

ა) სამფაზა ასინქრონული ძრავების ბრუნვის ხიჩქარის რეგულირების შესაძლებელი მეთოდები. $n_2 = (1-s)n_1$ ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ სამფაზა ასინქრონული ძრავების ბრუნვის სიჩქარე დამოკიდებულია სრიალზე და მაგნიტური არეს ბრუნვის სიჩქარეზე. თუ ამა თუ იმ გზით შევცვლით s და n_1 , შესაძლებელია ვარეგულიროთ ძრავის ბრუნვის სიჩქარე.

ამოცხნით რა მომენტის განტოლებას (32,7)

$$M = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{s \omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]}$$

სრიალის მიმართ, მოვნახავთ:

$$s = \varphi(U_1, M, \omega_1, r_1, r_2', x_1, x_2') \quad (37,1)$$

(37,1) ტოლობა გვიჩვენებს, რომ ლილვზე მუდმივი წინააღმდეგობის მომენტის შემთხვევაში, თუ $\omega_1 = \text{const}$ ასინქრონული ძრავის სრიალის რეგულირება შესაძლებელია განვახორციელოთ შემდეგი საშუალებებით:

- 1) სტატორზე მოყვანილი ძაბვის ცვლილებებით;
- 2) სტატორისა და როტორის წრედების წინააღმდეგობების ცვლილებით.

ნეორეს მხრივ $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ განტოლებიდან გამომდინარეობს, რომ

მაგნიტური არეს სიჩქარის რეგულირება შესაძლებელია ორი გზით:

- 1) ქსელის სიხშირის ცვლილებით;
- 2) წყვილ პოლუსთა რიცხვის ცვლით.

გარდა ზემოთ ჩამოთვლილი ოთხი მეთოდისა, ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება შესაძლებელია განვახორციელოთ ასინქრონული ძრავების სხვა ელექტრულ მანქანებთან კასკადური შეერთებების საშუალებით.

სიჩქარის რეგულირებისათვის კასკადური შეერთებების არსი მდგომარეობს მასში, რომ სტატორიდან როტორზე მაგნიტური არეს საშუალებით გადაცემული ენერგიის ნაწილი გარდაიქმნება უშუალოდ ძრავის ლილვზე მექანიკური ენერგიის სახით, ხოლო როტორის გრაგნილში დანაკარგების გამოკლებით ენერგიის დანარჩენი ნაწილი სარეგულირებელი ძრავის როტორის წრედთან განსაზღვრული სქემით შეერთებული სხვა მანქანების საშუალებით უბრუნდება პირველად ქსელს, ანდა გარდაიქმნება დამატებით მექანიკურ ენერგიაში. ასეთი რეგულირების შესაძლებლობა გამომდინარეობს (28,5) განტოლებიდან, რომლის თანახმადაც

$$s = \frac{P_{12} - P'_2}{P_{12}} \quad (37,2)$$

თუ შევცვლით როტორზე გადაცემულ P_{12} და ძრავის ლილვზე P'_2 მექანიკურ სიმძლავრეებს შორის სხვაობას $P_{12} - P'_2$, შესაძლებელია კასკადური შეერთების საშუალებით ვარეგულიროთ ძრავის სრიალი s .

სიჩქარის რეგულირება შესაძლებელია აგრეთვე შეუღლებული ასინქრონული მანქანების საშუალებით, რომელთა ლილვების ბრუნვის სიჩქარეები მექანიკური გზით იკრიბება, ან აკლდება ერთმანეთს.

ბ) სრიალის რეგულირება პირველადი ძაბვის ცვლით. პირველად ძაბვას და სრიალს შორის კავშირი შესაძლებელია მოინახოს კლოსის მიახლოებითი ფორმულიდან (32,21). თუ ამ განტოლებას ამოვხსნით s -ის მიმართ, მივიღებთ:

$$s = s_m \frac{M_m}{M} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{M}{M_m}\right)^2} \right] \quad (37,3)$$

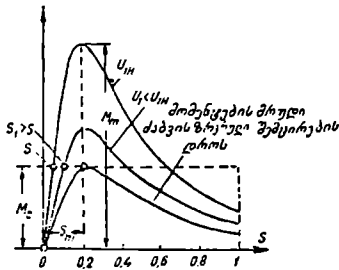
ჩვეულებრივად $\frac{M}{M_m} < 0,9$ და $s < s_m$, ამიტომ, თუ (37,3) განტოლებას დავშლით მწყრივად, მოვნახავთ:

$$s \approx \frac{s_m}{2} \left[\frac{M}{M_m} + \frac{1}{4} \left(\frac{M}{M_m}\right)^2 \right]. \quad (37,4)$$

სრიალის დამოკიდებულება ძაბვისაგან ადვილად შეიძლება მოვნახოთ აგრეთვე ძრავის მომენტის მრუდების შედარებიდან U_1 -ძაბვის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის (ნახ. 470).

როგორც (37,4) განტოლებიდან და ნახ. 470-დან გამომდინარეობს პირველადი ძაბვის შემცირების დროს, მაგალითად მარეგულირებელი ტრანსფორმატორის, ან ინდუქციური რეგულატორის საშუალებით, როდესაც ძრავის ლილვზე დატვირთვის მომენტი $M_c = \text{const}$, s სრიალი გაიზარდება, ენაიდან ადგილი ექნება M_m მაქსიმალური მომენტის შემცირებას (32,10).

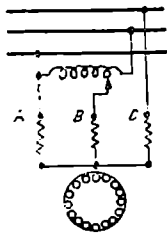
$M_c = M_m$ შემთხვევაში (37,3) განტოლების თანახმად $s = s_m$, ამიტომ სიჩქარის რეგულირების საზღვრები დამოკიდებული იქნება (32,8) ტოლობით განსაზღვრული s_m სრიალისაგან, რომელიც განისაზღვრება 32,8-ით. s_m სრიალის და, მაშასადამე, რეგულირების დიაპაზონის გაზრდის ყველაზე იოლ საშუალებას წარმოადგენს როტორის შესრულება გაზრდილი აქტიური r_2 წინააღმდეგობით, მხოლოდ უკანასკნელი დაკავშირებულია დანაკარგების ზრდასთან, ამიტომ ძრავის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება პირველადი ძაბვის რეგულირებით პრაქტიკულად გამოიყენება მხოლოდ ხანმოკლე—განმეორებითი დატვირთვის ამძრავებში.



ნახ. 470. სრიალის დამოკიდებულების განსაზღვრა U_1 ძაბვისაგან მომენტების მრუდების საშუალებით, როდესაც $M_c = \text{const}$.

ასეთი რეგულირების ნაკლს შეადგენს M_m მაქსიმალური მომენტის შემცირება U_1 ძაბვის კვადრატის პროპორციულად.

სრიალის რეგულირება შესაძლებელია აგრეთვე პირველადი სამფაზა ძაბვის სიმეტრიულობის დამახინჯებით (ნახ. 471). ასეთ დროს არსებული პირველადი ძაბვების უკუმბლდევრობის სისტემა ჰქმნის ძრავის ბრუნვის საწინააღმდეგოდ მიმართულ მომენტს, და, ამიტომ რეზულტიური მომენტის დამოკიდებულება სრიალისაგან იცვლება (ნაწ. IV, § 38). ეს კი საშუალებას გვაძლევს განვახორციელოთ ძრავის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება.



ნახ. 471.

გ) როტორის წრედში აქტიური წინააღმდეგობის ცვლით სრიალის რეგულირება. როტორის წრედში დამატებითი აქტიური წინააღმდეგობის ჩართვით შესაძლებელია განვახორციელოთ სრიალის რეგულირება ფართო ფარგლებში. ასეთი რეგულირების შესაძლებლობა და მისი საზღვრები გამომდინარეობენ მომენტის განტოლებიდან (37,3). (32,10) თანახმად M_m მაქსი-

მალური მომენტი არაა დამოკიდებული როტორის წრედის აქტიური წინააღმდეგობისაგან, მაშასადამე ძრავის ლილვზე მუდმივი დატვირთვის მომენტის დროს $M = M_c = \text{const}$ სრიალი s პირდაპირ პროპორციულ დამოკიდებულებაშია s_m სრიალისაგან, რომელიც თავის მხრივ, როგორც ეს ჩანს

(32,5)-დან, პირდაპირ პროპორციულია როტორის წრედის აქტიურ r_2 წინა აღწდევობის.

თუ M_c მომენტის მოცემული მნიშვნელობისათვის, როდესაც როტორის წრედში დამატებით წინააღმდეგობა არა გვაქვს ($r_{\Delta}=0$), სრიალი უდრის. s -ს, მაშინ, იმისათვის, რომ მივიღოთ სრიალის სხვა s' მნიშვნელობა, საჭიროა როტორის წრედში ჩავრთოთ წინააღმდეგობა r_{Δ} ისეთი სიდიდის, რომ დაცული იყოს ტოლობა

$$\frac{r_2 + r_{\Delta}}{r_2} = \frac{s'}{s},$$

საიდანაც

$$r_{\Delta} = r_2 \left(\frac{s'}{s} - 1 \right). \quad (37,5)$$

სრიალის რეგულირების ასეთი საშუალება დაკავშირებულია საგრძნობ დანაკარგებთან r_{Δ} დამატებით წინააღმდეგობაში და, ამიტომ ნაკლებად ეკონომიურია, მაგრამ პრაქტიკაში თავისი სიმარტივის გამო ხშირად გამოყენებული. ასეთი რეგულირება შესაძლებელია მხოლოდ საკონტაქტო რგოლებით ფაზურ როტორიან ასინქრონულ ძრავებში.

მარეგულირებელ რესტატებად ჩვეულებრივად გამოყენებულია რეგულირების მოცემული რეჟიმის შესაბამისი გადახურებისათვის გათვლილი მეთულიანი ან სითხის რესტატები.

დ) ძრავის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება პირველადი ქსელის სიხშირის ცვლით. ასინქრონული ძრავის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება f_1 სიხშირის ცვლით შესაძლებელია მხოლოდ მაშინ, როდესაც ის იკვებება სპეციალური ასინქრონული, ან კოლექტორული გენერატორისაგან.

რეგულირების დროს საჭიროა ვეცადოთ, რომ სიხშირის ცვლით არ გაუარესდეს ძრავის მუშა მახასიათებლები. ამას შესაძლებელია მივაღწიოთ f_1 სიხშირის ცვლასთან ერთად U_1 ძაბვის ცვლით ისეთნაირად, რომ მანქანის მაგნიტური სისტემის გაჟღენთა დარჩეს უცვლელი.

დაახლოებით შეგვიძლია მივიღოთ, რომ $U_1 \equiv f_1 \Phi$. ამიტომ, იმისათვის, რომ მანქანის საჭირო ღრეჟოში მაგნიტური ნაკადი და, მაშასადამე, მანქანის გაჟღენთა შევინარჩუნოთ მუდმივი სიდიდის, საჭიროა სიხშირის რეგულირების დროს დაცულ იყოს ფარდობა $\frac{U_1}{f_1} \equiv \Phi = \text{const}$. განვიხილოთ, როგორ მოქმედებს ამ პირობის დაცვა ძრავის მუშა მახასიათებლებზე.

(34,3)-ის თანახმად წრიული დიაგრამის დიამეტრი $D_k = \frac{U_1}{c_1 s'_{2k}} \equiv \frac{f_1 \Phi}{f_1} \equiv \Phi = \text{const}$. I_{θ} დენის ძალა, როგელიც $s=0$ სრიალის დროს უმთავრესად მანქანის გაჟღენთაზეა დამოკიდებული, $\Phi = \text{const}$ -ის შემთხვევაში, აგრეთვე პრაქტიკულად უცვლელი დარჩება.

$s = \pm \infty$ და $s=1$ წერტილების მდებარეობა წრიულ დიაგრამაზე სიხშირის რეგულირების შემთხვევაში იცვლება, როგორც ეს გამომდინარეობს ნახ.

423-დან, $\frac{r'_{2k} - r_2}{x'_{2k}} (s \pm \infty \text{ სათვის})$ და $\frac{r'_{2k}}{x'_{2k}} (s=1\text{-სათვის})$ შეფარდებების

შესაბამისად, რომლებიც სიხშირის უკუპროპორციულად იცვლება.

მხოლოდ $s=1$ და $s=\pm\infty$ წერტილების გადაადგილება და, მაშასადამე, მომენტის და სიმძლავრის ხაზების გადაადგილება, მაშინაც კი, როდესაც სიხშირე დიდ ფარგლებში იცვლება, მცირეოდენად ხდება.

ამგვარად, ჩვენ უნდა მივიღეთ დასკვნამდე, რომ f_1 სიხშირისა და U_1 ძაბვის ერთდროული და პროპორციული რეგულირების შემთხვევაში ძრავის მუშა მახასიათებლები იცვლება მეტად უმნიშვნელოდ და, მაშასადამე, ძრავის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირების ასეთი მეთოდი წარმოადგენს საკმარისად ეკონომიურს¹.

ვ) ძრავის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება წყვილ პოლუსთა რიცხვის ცვლით. სიჩქარის მდოვრი რეგულირების ყველა მეთოდებისაგან განსხვავებით, წყვილ პოლუსთა რიცხვის ცვლა საშუალებას გვაძლევს განვახორციელოთ რეგულირება მხოლოდ საფეხურებით. მაგალითად $f=50\text{Hz}$ -ის დროს, თუ წყვილ პოლუსთა რიცხვს $P=1$ შეცვლით $P=2$ წყვილ პოლუსთა რიცხვით, მაშინ მივიღებთ სიჩქარის ორ საფეხურს: 3000 ბრ/წუთში — და 1500 ბრ/წუთში.

ფაზურ როტორიან ასინქრონულ ძრავში წყვილ პოლუსთა რიცხვის ცვლისათვის აუცილებელია სტატორისა და როტორის გრაგნილის ერთდროული გადართვა. როტორზე საკონტაქტო რგოლების რიცხვის გაზრდის თავიდან აცილების მიზნით, ძრავებს, სადაც საჭიროა წყვილ პოლუსთა რიცხვის გადართვა მოკლედ შერთული როტორით, ასრულებენ უმთავრესად ციყვის ბორბლის სახით. ასეთი როტორი ვარგისია წყვილ პოლუსთა ნებისმიერი რიცხვისათვის.

სტატორზე პოლუსთა რიცხვის ცვლილებისათვის შესაძლებელია ორი საშუალება:

1) სტატორის ღრმულეებში ორი, ან რამდენიმე სხვადასხვა P წყვილ პოლუსთა რიცხვის მქონე დამოუკიდებელი გრაგნილის მოთავსება, და

2) სტატორის გრაგნილის გადართვა ერთი წყვილი პოლუსთა რიცხვიდან მეორეზე. აგრეთვე შესაძლებელია ორივე ამ საშუალების კომბინირება.

გრაგნილები პოლუსთა რიცხვის გადართვით წამოყენებული იყო პირველად 1897 წელს დალანდერისა (Dahlander) და ლინდსტრემის (Lindström) მიერ. მათი შესრულების პრინციპი ადგილი გასაგებია ნახ. 472-დან.

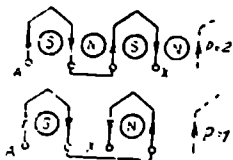
მაგალითის სახით განვიხილოთ სიმენს-შუეგერტის ფირმის მიერ წამოყენებული ორფენა გრაგნილი, სადაც წყვილ პოლუსთა რიცხვის გადართვა განხორციელებულია ფარდობით 1:2.

ყოველი ფაზის გრაგნილი იყოფა ორ ნაწილად (მაგალითად A ფაზა

¹ გაუქვნივთავი მანქანისათვის ძაბვისა და სიხშირის ერთდროული რეგულირების შემთხვევაში პროფ. მ. პ. კოსტენკოს თანახმად რეკომენდებულია დავიკეთო პირობა $\frac{U_1}{f_1 \sqrt{M}} = \text{const.}$ (იხ. ჟურნ. „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ № 2, 1952 წ.)

A_1, x_1 , და A_2, x_2 -ედ), რომლებიც ირთვება თანხვედრილად ($P=4$) ან ერთი მეორის შემხვედრად ($P=2$).

ნახ. 473-ზე ნაჩვენებია ასეთი გრაგნილის გაშლილი სქემა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს განვახორციელოთ გადართვა $P=2$ -დან $P=4$ -ზე. გრაგნილი ყულფური შესრულებისაა ბიჯით $y_1 =$



$= \frac{\tau}{2}$, სადაც τ საპოლუსო დანაყოფია $P=2$ -სათვის, ამიტომ $P=4$ -სათვის ბიჯი საპოლუსო დანაყოფის ტოლია.

რვა პოლუსის შემთხვევაში ყოველი პოლუსის ქვეშ მოდის $\frac{48}{8} = 6$ ღრმული, საი-

ნახ. 472. გრაგნილის შესრულების პრინციპი წყვილ პოლუსთა რიცხვის გადართვით;

დანაც $\frac{2}{3}$ ე. ი. 4 ღრმული, ყოველ ფენაში

დაკავებულია ერთი ფაზით. ყოველი

ფაზის გრაგნილს აქვს 4 გამომყვანი ისე, რომ სტატორის გრაგნილიდან მთლიანად გამოყვანილია 12 ბოლო, რომლებიც მიერთებულია ნახ. 474-ზე ნაჩვენებ გადამართულზე.

ნახ. 473-ზე ისრებით ნაჩვენებია დენების მიმართულება გამტარებში დროის იმ მომენტისათვის, როდესაც დენი A ფაზაში მაქსიმალური მნიშვნელობისაა, ხოლო B და C ფაზებში დენს ორჯერ ნაკლები მნიშვნელობა აქვს და მიმართულია საწინააღმდეგოდ.

ნათქვამის შესაბამისად ყოველ ღრმულს აქვს ორი სათანადო მიმართულების ისარი (მსხვილი და წვრილი). 473 ნახაზის მარცხენა ნაწილში ისრების მიმართულება ნაჩვენებია გრაგნილის ოთხპოლუსა შეერთებისათვის, ხოლო მარჯვენა ნაწილში რვაპოლუსა შეერთებისათვის. ნახ. 473-ის ქვედა ნაწილში განხილული გრაგნილისათვის ნაჩვენებია დროის არჩეული მომენტისათვის დანამაგნიტებელი ძალის მრუდები. მათი ფორმა სიმეტრიულია, რასაც ყოველთვის არა აქვს ადგილი სხვადასხვა პოლუსთა რიცხვზე გადასართველ გრაგნილებში.

იმისათვის, რომ ოთხპოლუსა და რვაპოლუსა გრაგნილების შემთხვევაში მივიღოთ დაახლოებით ტოლი ბრუნვის მომენტები, საჭიროა რვა პოლუსის შემთხვევაში გრაგნილის ფაზები შევართოთ ვარსკვლავად, ხოლო ოთხი პოლუსის შემთხვევაში სამკუთხედად (ნახ. 475).

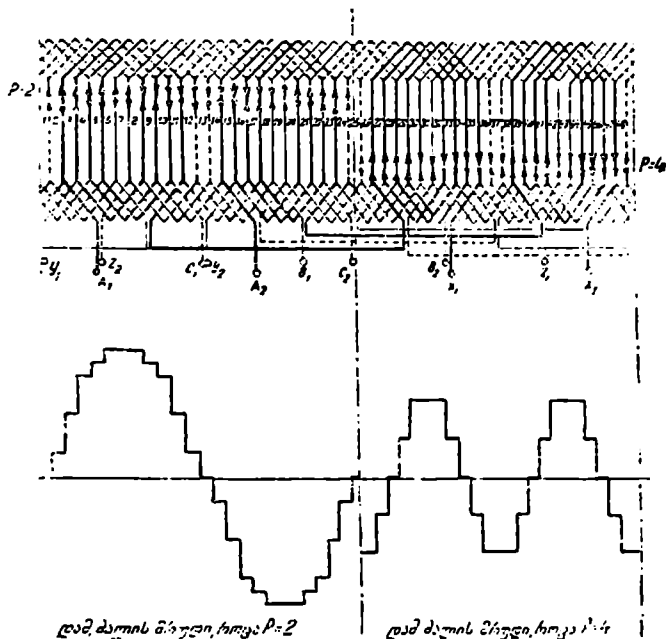
ვაჩვენოთ, რომ ასეთ პირობებში ბრუნვის მომენტები $P=2$ და $P=4$ შემთხვევისათვის პრაქტიკულად ერთი მეორის ტოლია.

ვინაიდან ე. მ. ძ. $E = k_{\omega} \Phi$ და $\Phi = \frac{2}{\pi} B_z \frac{\pi D}{2\rho}$, სადაც B_z მანქანის

საპაერო ღრეჩოში ინდუქციის მრუდის ძირითადი სივრცული ჰარმონიკის ამპლიტუდაა, ხოლო D სტატორის გამოჩარხვის დიამეტრი, ამიტომ

$$\frac{B_z}{B'_z} = \frac{E k'_{\omega} p}{E' k_{\omega} p'} \quad (37,6)$$

აქ შტრიხით ნაჩვენები სილიდები შეესაბამება გრაგნილის რეპოლუსიან შეერთებას.



ნახ. 473. გრაგნილის სქემა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ წყილ პოლუსთა რიცხვის გადართვა $p=2$ -დან $p=4$ -ზე. დაბლა ნაჩვენებია დამამგნიტებელი ძალების მრუდები, როდესაც დენის ძალა A ფაზაში ამპლიტუდური მნიშვნელობისაა.

განსახილველი გრაგნილისათვის $w=w'$, $E:E'=V\sqrt{3}$ და ნაწ. III, § 22-ის თანახმად

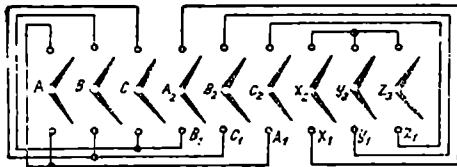
$$K_{\pi} = k_p k_y = \frac{\sin 4 \frac{2\pi}{48}}{4 \sin \frac{2\pi}{48}} \cdot \sin \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} = 0,677;$$

$$k'_{\pi} = \frac{\sin 4 \frac{2\pi}{48}}{4 \sin \frac{2\pi}{48}} = 0,836.$$

თუ ამ წინაშენლობებს შევიტანთ (37,6) ტოლობაში, მივიღებთ:

$$\frac{B_z}{B'_z} = \sqrt{3} \frac{0,836}{0,677} \cdot \frac{2}{4} = 1,06 \approx 1.$$

რადგანაც ბრუნვის მომენტი ინდუქციისა და როტორის დენის ნამრავლის პროპორციულია და დენი პოლუსთა რიცხვის გადართვის დროს არ-



A, B, C-ჯგუფის მოწყობები

ნახ. 474. ნახ. 437 გრაგნილის გადამრთველი.

იცვლება, ვინაიდან ის უმთავრესად განისაზღვრება მანქანის გადახურებით¹, ამიტომ, ბრუნვის მომენტი $M \approx M'$, ხოლო სიმძლავრე $P = \omega M = 2\omega' M' = 2P'$.

ზოგიერთ შემთხვევაში გრაგნილის გადართვის დროს საჭიროა შევინარჩუნოთ მუდმივი სიმძლავრე, ასეთ დროს ხელ-

საურელია ავიღოთ $\frac{B_z}{B'_z} \approx \frac{p}{p'}$.

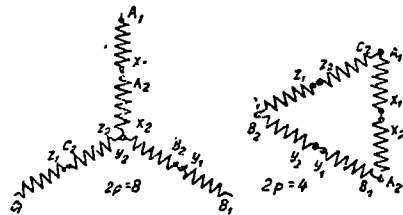
პრაქტიკაში ხშირად გვიხდება ამ ტოლობის დარღვევა.

თანამედროვე პირობებში კეთდება ორი, სამი და ოთხ სიჩქარიანი ძრავები, ამასთან ორ უკანასკნელ ტიპს სტატორზე აქვს ჩვეულებრივად ორი გრაგნილი.

ვ) ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება კასკადური შეერთებების საშუალებით. ქვემოთ ჩვენ განვიხილავთ მხოლოდ ორი ასინქრონული მანქანის კასკადურ შეერთებას. ასინქრონული ძრავის სხვა მანქანებთან კასკადური შეერთებები განხილული იქნება კურსის სხვა ნაწილში.

ორი ასინქრონული მანქანის კასკადური შეერთების დროს² მათი როტორები შეერთებული არიან საერთო ლილვით, ან რედუქტორის საშუალებით.

პირველი მანქანის როტორის რგოლებთან ჩვეულებრივად მიერთებულია მეორე მანქანის როტორი, რომლის სტატორიც ამ შემთხვევაში წარმოადგენს



ნახ. 475. ნახ 473-ზე ნაჩვენები გრაგნილის შეერთების სქენა. ვარსკლავად ($2p=8$) და სამკუთხედად ($2p=4$).

¹ მნიშვნელობაში უნდა მივიღოთ ის მდგომარეობა, რომ ბრუნვის სიჩქარის ცვლის დროს იცვლება გაცივების პირობები (ნაწ. 1, §, 5).

² ასეთი შეერთება წამოყენებული იყო ერი მეორისაგან დამოუკიდებლად გ. გიორგისისა და კ. შტეინმეტცის მიერ 1893 წ.

მეორად წრედს (ნახ. 476). როტორის გრაგნილების შეერთება ისეთნაირია, რომ ორივე მანქანის ბრუნვის მომენტების მიმართულება თანხვედრილია.

განვსაზღვროთ კასკადური აგრეგატის ბრუნვის სიჩქარე n_2 , თუ მანქანების პოლუსთა რიცხვი შესაბამისად ტოლია $2p_1$ და $2p_2$.

როდესაც აგრეგატის ბრუნვათა რიცხვი წუთში n_2 უდრის, მაშინ დენისა და ე. მ. ძ.-ის სიხშირე როტორების წრედში ტოლია:

$$f_2 = \frac{n_1 - n_2}{60} p_1,$$

სადაც n_1 — პირველი მანქანის მაგნიტური არეს ბრუნვის სიჩქარეა,

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p_1}.$$

მეორე მანქანის მაგნიტური არე მისი პირველადი გრაგნილის (როტორის) მიმართ წუთში ბრუნავს სიჩქარით

$$\frac{60 f_2}{p_2} = (n_1 - n_2) \frac{p_1}{p_2}.$$

მეორე მანქანას (მოკლედ შერთულს), როგორც ძრავს, მდგრადად შეუძლია იმუშაოს მხოლოდ იმ სიჩქარეებით, რომლებიც ახლოსაა მისი მაგნიტური არეს ბრუნვის სიჩქარესთან, ე. ი. სიჩქარესთან,

$$n_2 = (n_1 - n_2) \frac{p_1}{p_2}$$

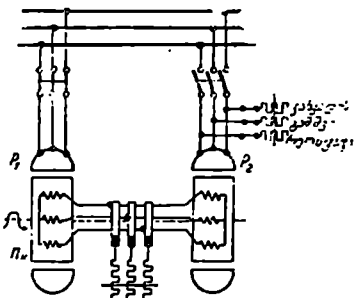
ანუ

$$n_2 = \frac{n_1 p_1}{p_1 + p_2} = \frac{60 f_1}{p_1 + p_2}. \quad (37,7)$$

(37,7) ტოლობა გვიჩვენებს, რომ კასკადური აგრეგატის სინქრონული სიჩქარე ტოლია ისეთი ძრავის სინქრონული სიჩქარისა, რომლის წვეილ პოლუსთა რიცხვია $p_1 + p_2$.

ამგვარად, ორი ასინქრონული ძრავის კასკადური შეერთებით შესაძლებელია მივიღოთ ბრუნვის სიჩქარის სამი მდგრადი საფეხური: 1) $n_1 = \frac{60 f_1}{p_1}$,

2) $n_2 = \frac{60 f_1}{p_2}$ და 3) $n_3 = \frac{60 f_1}{p_1 + p_2}$. პირველი საფეხური შეესაბამება მხოლოდ მარტო პირველი მანქანის მიერთებას ქსელთან. მეორესაფეხური შეესაბამე-



გამწევი ტროლიკავი ძრავის ინდუქციური მუშაობისათვის

ნახ. 476. ორი ასინქრონული ძრავის კასკადური შეერთების სქემა.

¹ მოხერხების თვალსაზრისით სიჩქარის საფეხურები განმოსახულია სინქრონული ბრუნვითა რიცხვით წუთში.

პა ზეხოლოდ მარტო მეორე მანქანის ჩართვას და მესამე საფეხური მათ კასკადურ შეერთებას.

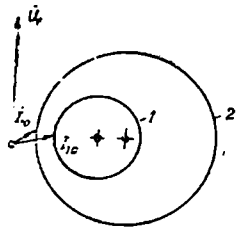
სიმძლავრე P_{12} , რომელსაც პირველი ძრავის სტატორი მბრუნავი არეს საშუალებით გადასცემს როტორს, იყოფა ორ ნაწილად. პირველი ნაწილი მექანიკური სიმძლავრის სახით უშუალოდ გადაეცემა აგრეგატის ლილვს, ეს სიმძლავრე ტოლია $P'_2 = P_{12} \frac{n_2}{n_1}$. სრიალის პროპორციული მეორე ნაწილი,

რომელიც ტოლია $P''_2 = P_{12} \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, ელექტრული სიმძლავრის სახით გადაეცემა მეორე ძრავს, რომელშიც ხდება მისი გარდაქმნა მექანიკურ ენერგიად.

თუ დანაკარგებს უგულვებელყოფთ, მაშინ თითოეული მანქანის ლილვზე გადაცემული სიმძლავრეების შეფარდება ტოლი იქნება:

$$\frac{P'_2}{P''_2} = \frac{n_2}{n_1 - n_2} = \frac{p_1}{p_2}. \quad (37,8)$$

კასკადური აგრეგატის მუშაობის დროს პირველი ძრავის მიერ ქსელიდან მიღებული დამაგნიტების სიმძლავრე იხარჯება ორივე მანქანის მაგნიტური არეების შექმნაზე, რის გამოც კასკადის უქმი სვლის დენი გაცილებით მეტია, ვიდრე რომელიმე ცალკეული მანქანის მუშაობის შემთხვევაში.



ნახ. 477. კასკადის (1) და ინდივიდუალურად მომუშავე ძრავის (2) დენის დიაგრამების შედარება.

ორი მანქანის მიმდევრობითი შეერთების გამო მოკლედ შერთვის წინააღმდეგობა დიდია, ხოლო მოკლედ შერთვის დენი ნაკლებია, ვიდრე ერთი მანქანისათვის. ეს იწვევს კასკადური შეერთების სიმძლავრის კოეფიციენტისა და მაქსიმალური მომენტის საგრძნობ შემცირებას, როგორც ეს ჩანს ნახ. 477-დან, რომელზედაც მოყვანილია კასკადისა და ინდივიდუალურად მომუშავე ძრავის დენის დიაგრამების შედარება.¹

თუ კასკადაში შემავალ ძრავებს შევასრულებთ წვეილ პოლუსთა რიცხვის გადართვით, მაშინ კასკადური შეერთების საშუალებით შესაძლებელია ზვიდლოთ სიჩქარის საფეხურთა დიდი რიცხვი.

წ) სიჩქარის რეგულირება შეუძლებელი ძრავებით. სიჩქარის საფეხურებიანი რეგულირებისათვის, თუ საჭიროა $f = 50 \text{ Hz}$ -ის შემთხვევაში 3000 ბრ/წუთზე მაღალი საფეხურების მიღება, შესაძლებელია გამოყენებულ იქნეს შეწყვილებული ძრავები. ასეთი ძრავის ერთ-ერთი შესაძლებელი სქემა ნაჩვენებია ნახ. 478-ზე.

¹ სინამტრივისათვის კასკადის დენის დიაგრამა ნახ. 477-ზე ნაჩვენებია წრფეხით; სინამტრივში კი დიაგრამა წარმოადგენს წრფეხითა დახლოებულ მეოთხე ხარისხის რიგის წრფეს.

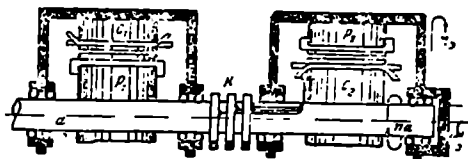
2*p*₁ პოლუსა C₁ სტატორის გრაგნილის f₁ სიხშირის დენით ჯევის შემთხვევაში a ლილვის ბრუნვის სიჩქარე ტოლია $n_a = \frac{60f_1}{p_1} (1 - s_a)$, სადა C₂—სრიალია. a ლილვზე დამაგრებულია მეორე ძრავის C₂ სტატორი 2*p*₂ პოლუსთა რიცხვით, რომელიც იკვებება X რგოლების საშუალებით იგივე f₁ სიხშირის დენით. მაგნიტური არე C₂ სტატორის მიმართ ბრუნავს სიჩქარით $\pm n_2 = \frac{60f_1}{p_2}$. ხოლო სივრცეში სიჩქარით $n_a \pm n_2$ ¹. b ლილვთან შეერთებული *p*₂ როტორი ბრუნავს სიჩქარით

$$n_b = (n_a \pm n_2)(1 - s_b) = 60f_1 \left(\frac{1 - s_a}{p_1} \pm \frac{1}{p_2} \right) (1 - s_b). \quad (37,9)$$

b ლილვის ბრუნვათა რიცხვის სინქრონულ სიჩქარეს ვლებულობთ s_a=s_b=0 ტოლობის დროს;

$$n_{bc} = 60f_1 \frac{p_2 \pm p_1}{p_1 p_2}. \quad (37,10)$$

მაგალითად, როდესაც p₁=1, p₂=3 და f₁=50 Hz ვლებულობთ სინქრონული სიჩქარეების შემდეგ საფეხურებს: 1) 4000 ბრ/წუთ., 2) 3000 ბრ/წუთ. 3) 2000 ბრ/წუთ. 4) 1000 ბრ/წუთ, საიდანაც მეორე საფეხურის მიღება ხდება მხოლოდ მარტო პირველი ძრავის მუშაობის დროს (ასეთ დროს a და b ლილვები შეერთებულია სპეციალური ქუროთი), ხოლო მეოთხე საფეხურის მიღება მხოლოდ მეორე ძრავის მუშაობის დროს (a ლილვი ამ შემთხვევაში დამუხრუქებული უნდა იყოს). თუ შესაძლებელია C₁ სტატორის გრაგნილის p₁ წყვილპოლუსთა რიცხვის ცვლილება გადართვით, მაშინ საფეხურების რიცხვი იზრდება.



ნახ. 478. შეუღლებული ასინქრონული ძრავის სტენატორი ნოწყობილობა.

თ) ასინქრონული ძრავების ელექტრული დამუხრუქება. ხშირ შემთხვევაში საჭიროა ძრავის სწრაფი და მდოვარი გაჩერება. თუ ამ მიზნით ძრავს უბრალოდ, მხოლოდ ქსელიდან გამოვრთავთ, მისი გამორბენა მბრუნავი მასების საგრძნობი ინერციის მომენტის შემთხვევაში შესაძლებელია საგრძნობლად დიდხანს გაგრძელდეს. ძრავის დამუხრუქება საჭიროა აგრეთვე ამწვევ და სატრანსპორტო დანადგარებში ტვირთის ჩაშვების სიჩქარის შეზღუდვის, ან მოძრავი ნაწილის დაღმართზე შენელებისათვის.

¹ ნიშანი (+) შესაბამება იმ შემთხვევას, როდესაც a ლილვისადა e₂ სტატორის მიერთებული მაგნიტური არეს ბრუნვის მიმართულება ერთმანეთს ემთხვევა. ნიშანი (-) შესაბამება უბრუნებულ შემთხვევას.

ასინქრონული ძრავების სუფთა ელექტრული წესით დამუხრუქებისათვის ჩვეულებრივად გამოიყენებენ ორ მეთოდს:

1. დამუხრუქება წინაღობით, რომლის დროსაც გადართავენ სტატორის ორ ფაზას და ძრავს აიძულებენ იბრუნოს არც საწინააღმდეგო წინართულებით. ძრავი ასეთ დროს მუშაობს ელექტრომაგნიტური მუხრუქის რეჟიმში (ნაწ. IV, § 32).

2. რეკუპერაციული დამუხრუქება, რომლის დროსაც ხდება ძრავის გადაყვანა გენერატორულ რეჟიმში და მბრუნავი ან მოძრავი მასების ენერჯია გარდაიქმნება ელექტრულ ენერჯიად და ქსელს გადაეცემა.

ჩვენ შევჩერდებით მხოლოდ ელექტრული დამუხრუქების ზოგიერთი ძირითადი პროცესების განხილვაზე, ვინაიდან ეს საკითხი უფრო დაწვრილებით განხილულია ელექტრული ამძრავის სპეციალურ კურსში.¹

1. ძრავის თვითდამუხრუქება ქსელიდან გამორთვის შემთხვევაში.

თუ ასინქრონული ძრავის ქსელიდან გამორთვის მომენტში ბრუნავდა სიჩქარით $\omega = \omega_2$, მაშინ მისი თვითდამუხრუქებით გაჩერებისათვის საჭირო t_0 დროის განსაზღვრა ხდება შემდეგნაირად.

მბრუნავ მექანიზმთან შეერთებულ როტორის კინეტიკური ენერჯია აკუმულირებული სიჩქარის დროს ტოლია $A_k = J \frac{\omega^2}{2}$.

გამორბენის პროცესში (თვითდამუხრუქება) კინეტიკური ენერჯიის დანაკარგი ტოლია ხახუნის ძალების მუშაობის, ამიტომ

$$-\frac{dA_k}{dt} = -J \frac{d\omega}{dt} = M'_m \omega, \quad (37,11)$$

სადაც M'_m — ხახუნის ძალების მომენტი (საკისრებში, ჰაერთან და სხვა).

თუ პირველი მიახლოებით ჩავთვლით, რომ $M'_m \approx \text{const}$ და მოვანდენო ცვლადი პარამეტრების განცალკევებას შემდგომი ინტეგრებით, მივიღებთ:

$$t_0 = \int_0^{t_0} dt = - \frac{J}{M'_m} \cdot \int_{\omega_2}^0 d\omega = \frac{J\omega_2}{M'_m}, \quad (37,12)$$

აბ

$$t_0 = \frac{J\omega_2^2}{M'_m\omega_2} = \frac{2A_{k0}}{P_m}, \quad (37,13)$$

აქ A_{k0} როტორის კინეტიკური ენერჯიაა საწყისი ω_2 სიჩქარის დროს, ხოლო P_m დანაკარგები ხახუნზე იგივე ω_2 სიჩქარისათვის.

(37,13) განტოლებიდან გამომდინარეობს რომ თვითდამუხრუქების დრო პირდაპირ პროპორციულია მბრუნავი მასების კინეტიკური ენერჯიის, რომე-

* მაგალითად, პროფ. ვ. კ. პოპოვის წიგნი „Применение электродвигателей в промышленности“, ნაწ. II, 1935 წ.

ლიც მათ აქვთ გამორთვის მომენტში, და უკუპროპორციულია ხახუნზე დანაკარგების.

1. ძრავის დამუხრუქება წინა აღჩართვის მეთოდით. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ამ მეთოდით დამუხრუქების შემთხვევაში ძრავის გამორბენა ხდება მაგნიტური არეს ბრუნვის საწინააღმდეგო მიმართულებით, მუშაობს რა ელექტრომაგნიტური მუხრუქის რეჟიმში ე. ი. სრიალით $s > 1$. არეს ბრუნვის მიმართულების შეცვლა ხდება გადანართელის საშუალებით, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 479-ზე.

ელექტრომაგნიტური მუხრუქის რეჟიმის გამოკვლევა შესაძლებელია წრიული დიაგრამის საშუალებით (ნაწ. IV, § 34). ასეთ დროს გრაფიკული აგება P_1 , P'_2 (ამ სიმძლავრეს მუხრუქულ რეჟიმში აქვს უარყოფითი მნიშვნელობა), M , $\cos \varphi_1$ და s -ის განსაზღვრისათვის რჩება ისეთივე, როგორც ძრავის რეჟიმისათვის. სამუხრუქო რეჟიმში ასინქრონული მანქანის მიერ განვითარებული მომენტი განისაზღვრება კლოსის ფორმულიდან:

$$M = M_m \frac{2 + \beta s_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + \beta s_m} \quad (37,14)$$

გარდა ამისა მოცემული რეჟიმისათვის ჩვენ გვაქვს

$$s = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1} \quad \text{და} \quad \omega_2 = \omega_1(s - 1).$$

მაშასადამე:

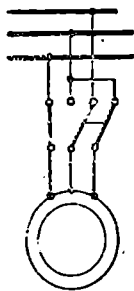
$$J \frac{d\omega_2}{dt} = J \omega_1 \frac{ds}{dt} \quad (37,15)$$

ჩავთვალოთ, რომ ძრავით დაბრუნებული მუშა მექანიზმი გამორბენის პროცესში არავითარ სასარგებლო მუშაობას არ ასრულებს და, რომ მისი ხახუნის ძალებისაგან შექმნილი წინაღობის მომენტი ნულთან ახლოს, მაშინ ნოდრაობის განტოლება გამორბენის პროცესისათვის შესაძლებელია დაიწეროს შემდეგი სახით:

$$M_m \frac{2 + \beta s_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + \beta s_m} + J \omega_1 \frac{ds}{dt} = 0 \quad (37,16)$$

თუ დამუხრუქების პროცესის დასაწყისში დავუწვავთ $s=2$ და ავოკნანით წინა განტოლებას, მივიღებთ:

$$t_0 = - \frac{J \omega_1}{M_m (2 + \beta s_m)} \int_2^1 \left(\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + \beta s_m \right) ds$$



ნახ. 479. წინააღმართით დამუხრუქების სქემა.

ან ინტეგრების შემდეგ

$$t_0 = -\frac{T}{2+\beta s_m} \left(\frac{3}{2s_m} + \beta s_m + 0,695 s_m \right). \quad (37,17)$$

ამ განტოლების მიხედვით აგებული დამოკიდებულება $\frac{t_0}{T} = f(s_m)$, $\beta=0$

და $\beta=2$ მნიშვნელობებისათვის ნაჩვენებია ნახ. 480-ზე. ამ მრუდებიდან ჩანს, რომ გამორბენის დრო t_0 შესაძლებელია შემცირებულ იქნას საგრძნობლად და პრაქტიკულად გაუტოლდეს დროის მექანიკურ მუდმივას T -ს, თუ დამუხრუჭების პერიოდში ძრავის როტორის წრედში ჩავრთავთ ისეთ რა აქტიურ წინააღმდეგობას, რომლის დროსაც $s_m \approx 1$. (32,9)-ის თანახმად ეს წინააღმდეგობა ტოლი უნდა იყოს:

$$r_A \approx x_2 - r'_2.$$

განესაზღვროთ როტორის წრედში ენერჯიის თბური A_m დანაკარგები წინაღობათვით დამუხრუჭების შემთხვევაში.

როტორის წრედში დანაკარგები სრილის პროპორციულია, ამიტომ

$$A_m = \int_0^{\omega} \omega_1 \Delta s dt. \quad (37,18)$$

გამორბენის პროცესში ძრავის მომენტი M გაწონასწორებულია მხოლოდ ინერციის ძალების მომენტით (37,15): $M = -J \omega_1 \frac{ds}{dt}$.

მომენტის ეს მნიშვნელობა (37,18) განტოლებაში გვაძლევს

$$A_m = -J \omega_1^2 \int_1^{\omega} s ds = \frac{3}{2} J \omega_1^2. \quad (37,19)$$

თუ მიღებულ A_m მნიშვნელობას შევადარებთ ენერჯიის A'_m დანაკარგებს, რომელსაც ადგილი ჰქონდა როტორის წრედში დაუტვირთავი ძრავის გაქანების შემთხვევაში (36,27), მივიღებთ, რომ მბრუნავი მასების ინერციის მომენტის ერთი და იგივე მნიშვნელობისათვის როტორის წრედში ენერჯიის დანაკარგები წინაღობათვით დამუხრუჭების შემთხვევაში სამჯერ მეტია, ამასთან ორივე შემთხვევაში ეს დანაკარგები დამოუკიდებელია როტორის წრედის აქტიური წინააღმდეგობისაგან.

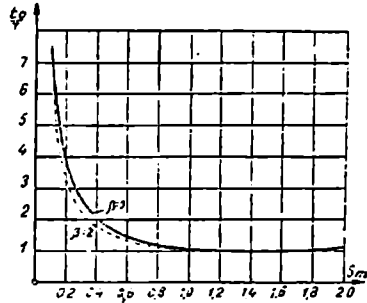
თუ განვიხილავთ რევერსირების პროცესს, ე. ი. დამუხრუჭებას და საწინააღმდეგო მიმართულებით ძრავის შემდგომ გაქანებას, მაშინ ცხადია, რომ უკმი სვლის დროს რევერსირების პროცესს როტორის წრედში ოთხჯერ მეტი დანაკარგები შეესაბამება, ვიდრე გაქანების დროს.

უნდა აღინიშნოს, რომ როტორის წრედში დანაკარგებისათვის მიღებული შეფარდება სამართლიანია არა მარტო უკმი სვლისათვის, არამედ საკმა-

რისი სიზუსტით იმ შემთხვევისათვისაც, როდესაც ძრავი მექანიკურად შეერთებულია დაუტვირთავ მუშა მექანიზმთან.

წინაღმართვით დამუხრუქების პრაქტიკული განხორციელების შემთხვევაში საჭიროა ზუსტად განვახორციელოდ ძრავის გამორთვა ქსელიდან იმ მომენტში, როდესაც მისი ბრუნვის სიჩქარე გაუტოლდება ნულს, ვინაიდან წინააღმდეგ შემთხვევაში ადგილი ექნება ძრავის გაქანებას საწინააღმდეგო მიმართულებით.

3. ასინქრონული ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუქება. დამუხრუქების ასეთი მეთოდის განხორციელებისათვის აუცილებელია ასინქრონული მანქანა გადავიყვანოთ ძრავული რეჟიმიდან გენერატორულ რეჟიმში. ასეთი შესაძლებლობა შეიქმნება, მაგალითად, იმ შემთხვევაში, როდესაც მუშა მექანიზმის მექანიკური სიჩქარე იზრდება უარყოფითი წინააღმდეგობის მომენტის ხარჯზე, რომელსაც ადგილი შეიძლება ჰქონდეს ამწვე მექანიზმებში ტვირთის ჩაშვების დროს, ხოლო სატრანსპორტო მოწყობილობებში ტვირთის დაღმართზე მოძრაობისას და სხვ.



ნახ. 480.

ძრავის გადაყვანა გენერატორულ რეჟიმში მაშინ, როდესაც მისი სიჩქარე სინქრონულზე დაბალია, შესაძლებელია სტატორის გრაგნილის პოლუსთა რიცხვის გაზრდით მისი სათანადო გადაართვით.

გენერატორულ რეჟიმში დამუხრუქების მომენტის გაზრდის მიზნით შესაძლებელია სტატორის გრაგნილის გადაართვა ვარსკვლავად შეერთებიდან სამკუთხედზე. ამ შემთხვევაში დამუხრუქების მომენტი იზრდება დაახლოებით სამჯერ.

4. ასინქრონული მანქანის გამორთვა ქსელიდან. ასინქრონული მანქანის ქსელიდან გამორთვის მომენტში ადგილი აქვს ასინქრონული მანქანის მაგნიტური არეს ენერჯის მოსპობით გაპირობებულ გარდამავალ პროცესს.

ქსელიდან გახსნილ როტორიანი მანქანის სწრაფად გამორთვის შემთხვევაში მაგნიტური არეს ენერჯის განთავისუფლება ხდება გამორთვის რკალის საშუალებით და არეს სწრაფი მოსპობის გამო მას შეუძლია გაბოიწვიოს სტატორის გრაგნილში საგრძნობი ზეცაბევები.

თუ როტორის გრაგნილი არაა გახსნილი, მაშინ სტატორის გრაგნილის გამორთვის დროს არეს მოსპობა ხდება უფრო დაგვიანებით, ვინაიდან როტორში აღძრული დენები ცდილობენ შეინარჩუნონ მაგნიტური არეს საწყისი მნიშვნელობა. არეს მიღვეადობის სიჩქარე დამოკიდებულია როტორის წრედის მუდმივებზე.

26. ელექტრული მანქანები.

საპერო ღრეხოში მაგნიტური ნაკადის მნიშვნელობა მანქანის ქსელიდან გამორთვის შემდეგ ტოლია:

$$\Phi_2 = \Phi \cdot e^{-\alpha_2 t}, \quad (37,20)$$

სადაც $\alpha_2 = \frac{r_2}{L_2}$, ხოლო Φ_2 —საპერო ღრეხოში მაგნიტური ნაკადია მანქანის ნორმალური მუშაობის დროს. მანქანის ქსელიდან გამორთვის შემდეგ როტორის გრაგნილში მოქმედი დენები წარმოადგენენ მიღებად პერიოდულ დენებს; ამიტომ მათ მიერ შექმნილი დამამაგნიტებელი ძალა როტორის გრაგნილის მიმართ უძრავია და თავის მაქსიმუმით ემთხვევა როტორის იმ ფაზას, რომელშიც დენის ძალას გამორთვის მომენტში ჰქონდა მაქსიმალური მნიშვნელობა.

როტორის დამამაგნიტებელი ძალა ქმნის სივრცეში როტორთან ერთად მბრუნავ არეს. გამორთვის შემდეგ როტორისა და არეს კუთხური სიჩქარე თანდათან ეცემა ω_2 მნიშვნელობიდან ნულამდე.

მანქანის ნორმალური მუშაობის შემთხვევაში მაგნიტური არე Φ ტოლია $\Phi = \Phi e^{j\omega_1 t}$.

ეს ნაკადი სტატორის გრაგნილში აღძრავს ე. მ. დ.-ს.

$$\dot{E}_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt} = -j\omega_1 \Phi \omega_1 \cdot e^{j\omega_1 t}. \quad (37,21)$$

თუ როტორის სრიალს უგულვებლევობთ, მაშინ შეიძლება ჩავთვალოთ რომ გამორთვის პირველხანებში Φ_2 მაგნიტური ნაკადი სტატორის გრაგნილში აინდუქტირებს ω_1 სიხშირის ე. მ. დ.-ს. ამიტომ (37,20) განტოლება სტატორის მიმართ ასეთნაირად გადაიწერება:

$$\Phi_2 = \Phi_3 \cdot e^{j\omega_1 t} = \Phi \cdot e^{-\alpha_2 t} \cdot e^{j\omega_1 t} = \Phi e^{j(\omega_1 - \alpha_2)t}. \quad (37,22)$$

Φ_2 ნაკადი სტატორის გრაგნილში აინდუქტირებს ე. მ. დ.-ს

$$\dot{E}'_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi_2}{dt} = -\omega_1(j\omega_1 - \alpha_2)\Phi \cdot e^{j(\omega_1 - \alpha_2)t} \quad (37,23)$$

(37,21) და (37,23) განტოლებებიდან გამომდინარეობს, რომ

$$\frac{\dot{E}'_1}{\dot{E}_1} = \left(1 + j \frac{\alpha_2}{\omega_1} \right) e^{-\alpha_2 t}. \quad (37,24)$$

შეტად საინტერესოა ამ შეფარდების მოდულის განსაზღვრა ამორთვის მომენტში ($t=0$);

$$\left(\frac{\dot{E}'_1}{\dot{E}_1} \right)_{t=0} = \sqrt{1 + \left(\frac{r_2}{\omega_1 L_2} \right)^2} \quad (37,25)$$

ამ გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ ქსელიდან მყისა (სწრაფი) გამორთვის შემთხვევაში სტატორის გრაფიკულში ძაბვა საგრძნობლად იზრდება, იმ შემთხვევაში, როდესაც როტორის აქტიური წინააღმდეგობა r_2 შედარებით დიდია¹. ეს მოვლენა იმით აიხსნება, რომ როტორის დიდი აქტიური

წინააღმდეგობის შემთხვევაში $\varphi_2 = \varphi_e - \frac{r_2}{L_2} l$ მაგნიტური ნაკადის მილევა ხდება სწრაფად და ადგილი აქვს გრაფიკულში დიდი სიდიდის ე. მ. ძ.-ის აღძვრას.

ცლებით მიღებული მონაცემების თანახმად გახსნილ როტორიანი ასინქრონული მანქანის ქსელიდან გამორთვის შემთხვევაში ზეძაბვები აღწევს ნორმალურ U_1 ძაბვის სამჯერად-ოთხჯერად მნიშვნელობებს.

ეს ზეძაბვები ასინქრონული მანქანის გამორთვის შემთხვევაში მეტი სიდიდისაა, ვიდრე იგივე სიმძლავრის გახსნილი მეორადი გრაფიკული ტრანსფორმატორის ქსელიდან ამორთვის შემთხვევაში. რადგანაც ასინქრონული მანქანის მაგნიტური ენერგია, მაგნიტურ სისტემაში სპაჰერო შუალედის არსებობის გამო, მეტია, ვიდრე ტრანსფორმატორში.

ზეძაბვების თავიდან ასაცილებლად ასინქრონული მანქანის ქსელიდან გამორთვა უნდა მოხდეს ჩაკეტილი როტორით.

ამ თვალსაზრისით უკეთეს პირობებში იმყოფება ასინქრონული მანქანები ციყვის ბორბლიანი როტორით.

საკონტაქტო რგოლებიანი ასინქრონული მანქანების ქსელიდან გამორთვის შემთხვევაში რგოლები მოკლედ უნდა იყოს შერთული მოკლედ ჩამკეტი მექანიზმის საშუალებით; თუ უკანასკნელი არა გვაქვს, მაშინ დასაწყისში მანქანას ქსელიდან გამორთავენ გამშვი რეოსტატის მუშა მდგომარეობისათვის და მხოლოდ შემდეგ გათიშავენ როტორის წრედს გამშვი რეოსტატის სახელურის გადაყვანით გამშვი მდებარეობაში.

§ 38. ასინქრონული მანქანის მუშაობის განსაკუთრებული ამოცანები

ამ თავში განხილული იქნება ასინქრონული მანქანის მუშაობის სპეციალური რეჟიმები, რომლებიც სრულიად არ იყენებ განხილული ზემოთ ან გაშუქებული იყო ნაწილობრივ. გარდა ამისა, განხილული იქნება ასინქრონული ძრავების ნორმალურისაგან განსხვავებულ პირობებში მუშაობის ექსპლოატაციისათვის ფრიად მნიშვნელოვანი საკითხები.

ა) გენერატორის რეჟიმი. ასინქრონული მანქანის მუშაობის გენერატორული რეჟიმის საერთო დახასიათება მოცემული იყო ზემოთ ნაწ. IV, § 30—34. ამის გამო ჩვენ ქვემოთ უმთავრესად განვიხილავთ ასინქრონული გენერატორების მუშაობასთან დაკავშირებულ პრაქტიკულ საკითხებს.

1. ასინქრონული გენერატორის პარალელური მუშაობა ასინქრონულ მანქანებთან. ნაწ. IV, § 30-ში ნაჩვენებია იყო, რომ ასინქრონული გენერატორი ქსელიდან იღებს აღზნებას, რომელსაც ის აწვდის თავის აქტიურ სიმძლავრეს. ეს შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ქსელში ასინქრონულ გენერატორთან პარალელურად მუშაობს ასინქრონული მანქანები, რომლებიც ასინქრონულ გენერატორს მისი მაგნიტური არეს

¹ გახსნილი როტორის შემთხვევაში $r_2 = \infty$, მაგრამ ზეძაბვები არაა უსასრულოდ დიდი სიდიდის, რადგან ეს გამომდინარეობს (37,25)-დან, ვინაიდან ჩაკეტილი როტორის როლს ამ შემთხვევაში სტატორისა და როტორის ასრულებენ გრიგლური დენების კონტურები.

შექნისათვის საჭირო რეაქტიული სიმძლავრით კვებას. ასეთი შეზღუდვა წარმოადგენს ასინქრონული გენერატორის არსებით ნაკლს. გარდა ამისა, ის ტვირთავს ქსელში მომუშავე სინქრონულ მანქანებს რეაქტიული ჩამორჩენილი დენით და ამით აუარესებს მათ სიმძლავრის კოეფიციენტს.

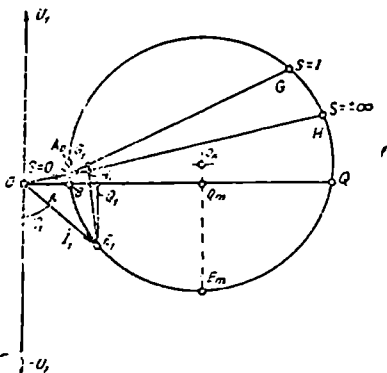
ასინქრონულმა გენერატორებმა დიდი გავრცელება ვერ ჰპოვეს პრაქტიკაში, ვინაიდან ბოლო დროს ელექტრული ენერჯის წარმოება მიმდინარეობს კონცენტრაციის გზით, ე. ი. ცალკეული მაგენერირებელი ერთეულების სიმძლავრის ზრდით. ასეთ პირობებში ასინქრონული გენერატორის დამოკიდებულება სხვა სინქრონული მანქანებისაგან გამოიწვევდა ელექტრული სისტემის მანევრირების შემცირებას და, გააუარესებდა გენერატორული სადგურების ურთიერთ რეზერვირების შესაძლებლობას.

ასინქრონულმა გენერატორმა პრაქტიკული გავრცელება მიიღო მხოლოდ შედარებით მცირე სიმძლავრის დამხმარე მნიშვნელობის ჰიდრო და თბოსადგურებში.

გაშვების დროს ასინქრონული გენერატორის სიჩქარეს ასწვენ დაახლოებით სინქრონულ სიჩქარემდე და ჩართავენ ქსელში.¹ გენერატორი ასეთ დროს აღიგზნება და მიიღებს თავის თავზე პირველადი ძრავის სიმძლავრის შესაბამის დატვირთვას. პირველადი ძრავის ბრუნვის მომენტის რეგულირებით შესაძლებელია შევამციროთ, ან გავზარდოთ ასინქრონული გენერატორისაგან ქსელში მიწოდებული აქტიური სიმძლავრე.

გენერატორის ქსელში ჩართვის მომენტში ისე, როგორც ასინქრონული ძრავის ჩართვის დროს (ნაწ. IV § 36) შესაძლებელია აღიძრას დამაგნიტების დენის ბიძგები და ზეძაბვები.

თუ ქსელის დატვირთვა მკვეთრად დაეცემა და ნაკლები გახდება ასინქრონული გენერატორის პირველადი ძრავის მიერ განვითარებულ სიმძლავრეზედ, მაშინ შესაძლებელია აგრეგატი გაიქცეს. ამ მოვლენის თავიდან ასაცილებლად საჭიროა პირვე-



ნახ. 481.

ლად ძრავზე მოვათავსოთ შესაფერისი ცენტრიდანული გამომრთველი.

ასეთივე მოვლენა შესაძლებელია აღიძრას ქსელში მოკლედ ჩართვის დროს. ამ შენთხვევაში გენერატორი აღგზნებას ჰქარავს, მისი წინალობის ელექტრომაგნიტური მომენტი თითქმის ნულამდე ეცემა და პირველადი ძრავის კარბი მომენტის ხარჯზე აგრეგატი იწყებს გაქანებას.

¹ ასეთ დროს აუცილებელია, რომ პირველადი ძრავის ბრუნვის მიმართულება მაგნიტური არეს ბრუნვის მიმართულებას დაემთხვეს.

ასინქრონული გენერატორის მუშაობის გამოკვლევა იოლი მოსახდენია, წრიული დიაგრამის დახმარებით. როგორც ზემოთ ნაწ. IV, § 34-ში იყო ნაჩვენები, დენის წრიული დიაგრამის წრეხაზი საერთოა ძრავული, სამუხრუჭო და გენერატორული რეჟიმებისათვის.

ნახ. 481-ზე ნაჩვენებია ასინქრონული გენერატორის წრიული დიაგრამა. წერტილი A_0 შეესაბამება ძრავის უქმ სვლას. თუ მანქანის ლილვს მოვდებთ დამატებით დადებით ბრუნვის მომენტს, მაშინ მანქანის გადაყვანა შესაძლებელია სინქრონიზმზე გავლით (A წერტილი) B წერტილამდე. ამ წერტილის შესაბამისი სრიალის დროს მანქანა ქსელიდან მოითხოვს მხოლოდ რეაქტიულ ჩამორჩენილ დენს. ამ რეჟიმის დროს მანქანაში ყველა დანაკარგების დაფარვა ხდება მის ლილვზე მიღებული მექანიკური სიმძლავრის ხარჯზე. ლილვზე მოდებული მომენტის შემდგომი ზრდით მანქანა გადადის გენერატორულ რეჟიმში და იწყება ქსელში აქტიური სიმძლავრის მიწოდება, სიდიდით $P_1 = m_1 U_1 \overline{E_1 Q_1}$, თუ $\overline{E_1 Q_1}$, მონაკვეთი გაზომილია დენის მასშტაბში. BQ ხაზი წარმოადგენს ასინქრონული გენერატორის სასარგებლო სიმძლავრის ხაზს. E_m წერტილში ასინქრონული გენერატორის სასარგებლო სიმძლავრე მაქსიმალური მნიშვნელობისაა: $P_{1m} = m_1 U_1 \overline{E_m Q_m}$. სრიალის (უარყოფითი) შემდგომი გაზრდით გენერატორის აქტიური სიმძლავრე დაიწყებს შემცირებას და Q წერტილში გახდება ნულის ტოლი, რადგანაც გენერატორზე მიყვანილი მთელი მექანიკური სიმძლავრე დაიხარჯება მასში დანაკარგების დასაძლევად.

Q და M წერტილებს შორის წრეხაზის რკალი შეესაბამება აგრეთვე გენერატორულ რეჟიმს, მხოლოდ ამ შემთხვევაში გენერატორი კი არ აწვდის ქსელს აქტიურ სიმძლავრეს, არამედ მისგან იღებს, რომელიც მანქანის ლილვზე მოყვანილ მექანიკურ სიმძლავრესთან ერთად იხარჯება მანქანაში დანაკარგების დასაძლევად. წრიული დიაგრამის უბანს E_m წერტილიდან H წერტილამდე პრაქტიკული მნიშვნელობა არა აქვს, ვინაიდან ის შეესაბამება საგრძნობლად დიდ უარყოფით სრიალებს.

AH ხაზი განსაზღვრავს გენერატორული რეჟიმის მომენტებს, რომლებიც საჭიროა მოვიყვანოთ ძრავის ლილვზე გენერატორის ბრუნვისათვის სხვადასხვა სრიალის დროს.

AH ხაზი მხედველობაში არ იღებს მექანიკური დანაკარგების დასაძლევ მომენტებს. მომენტი $M = \frac{m_1 U_1}{\omega_1} \overline{E_1 H_1}$ და მისი შესაბამისი ელექტრომაგნი-

ტური სიმძლავრე $P_{12} = \omega_1 M = m_1 U_1 \overline{E_1 H_1}$, თუ $\overline{E_1 H_1}$, მონაკვეთი გაზომილია დენის მასშტაბში.

AG ხაზი წარმოადგენს გენერატორის ლილვზე მიყვანილი მექანიკური სიმძლავრეების ხაზს: $P_2 = m_1 U_1 \overline{E_1 G_1}$. მექანიკური დანაკარგები P'_2 სიმძლავრეში არ შედის.

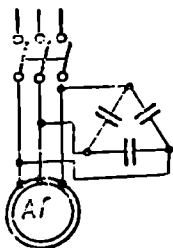
გენერატორის წრიული დიაგრამის ცალკეული წერტილების შესაბამისი სრიალის მნიშვნელობები განისაზღვრება ძრავის სრიალის შკალის გაგრძელებათ.

2. ასინქრონული გენერატორის მუშაობა ცალკეულ ქსელზე. ასინქრონული გენერატორის მუშაობა ცალკეულ ქსელზე შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც რაიმე საშუალებით განხორციელებულია გენერატორის აღზნება. ამას შესაძლებელია მივალწიოთ ორი საშუალებით:

1. მანქანის აღზნებით როტორის მხრიდან დაბალი სიხშირის დენებით. აღმზნებად ასეთ დროს გამოყენებულია სპეციალური ტიპის ცვლადი დენის კოლექტორული მანქანა. ასეთი აღმზნებები განხილული იქნება წინამდებარე კურსის მეორე ნაწილში.

2. სტატორის მომკერებზე მიერთებული კონდენსატორების საშუალებით როტორის ნარჩი მაგნიტიზმის ხარჯზე გენერატორის თვითაღზნებით (ნახ. 482).

ასეთი აღზნების პრინციპული შესაძლებლობა გამომდინარეობს ნახ. 481-დან. დამაგნიტების დენის რეაქტიული \overline{OA} მდგენელი ასინქრონული გენერატორის— \overline{U}_1 ძაბვის მიმართ წარმოადგენს წინგასწრებულს. ამიტომ კონდენსატორებში გამავალი წინგასწრებული რეაქტიული დენი გენერატორისათვის წარმოადგენს დამაგნიტებელს.



ნახ. 483-ზე ნაჩვენებია გენერატორის უქმი სვლის მახასიათებელი $I_{10r} = \varphi(U_1)$, როდესაც $f = \text{const}$; და კონდენსატორის დენის დამოკიდებულება ძაბვისაგან მის მომკერებზე $I_c = \psi(U_1)$. უქმი სვლის დროს გენერატორის აღზნების შემთხვევაში $I_{10r} = I_c$. თუ გენერატორის ბრუნვათა რიცხვს აიყვანთ მოცემულ ბრუნვის

ნახ. 483-ზე ნაჩვენებია გენერატორის უქმი სვლის მახასიათებელი $I_{10r} = \varphi(U_1)$, როდესაც $f = \text{const}$; და კონდენსატორის დენის დამოკიდებულება ძაბვისაგან მის მომკერებზე $I_c = \psi(U_1)$. უქმი სვლის დროს გენერატორის აღზნების შემთხვევაში $I_{10r} = I_c$. თუ გენერატორის ბრუნვათა რიცხვს აიყვანთ მოცემულ ბრუნვის

ნახ. 482. კონდენსატორების გამოყენებით ასინქრონული გენერატორის თვითაღზნების სქემა. სატორებზე, მაშინ როტორის ნარჩი მაგნიტური ნაკადით დაინდუქტირებული E_{0r} ე. მ. დ. კონდენსატორებში გაატარებს I_c დენის ძალას, რომელიც სტატორის გრაგნილში გავლით გაზრდის მის ე. მ. დ. E' მნიშვნელობამდე. E' ელექტრომომძრავებელი ძალა გაზრდის კონდენსატორების დენს I'_c მნიშვნელობამდე, რომელიც კიდევ უფრო დაამაგნიტებს გენერატორს და გაზრდის მის ე. მ. დ. E'' მნიშვნელობამდე და ა. შ., ვიდრე თვითაღზნების პროცესში გენერატორის ე. მ. დ. არ ნიაღწევს ორივე მახასიათებლების გადაკვეთის შესაბამის E მნიშვნელობას. გადაკვეთის წერტილში დამყარდება გენერატორისა და კონდენსატორების

ძაბვებს შორის წონასწორობა: $I_c \omega L = \frac{I_c}{\omega \cdot C}$, სადაც L —გენერატორის ინდუქტივობაა, ხოლო C —კონდენსატორის ერთ ფაზაზე დაყვანილი ტევადობაა.

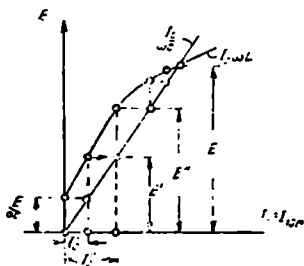
¹ ცალკეული ქსელის ქვეშ აქ გვეხმის ისეთი ქსელი, რომელსაც ჰყვებას მხოლოდ ასინქრონული გენერატორი და, რომელთანაც არაა მიერთებული სინქრონული მანქანები.

მოცემული ტოლობიდან მოცემული $f = \frac{\omega}{2\pi}$ სიხშირისათვის შესაძლებელია მოვძებნოთ დამოკიდებულება L ინდუქტიობასა და გენერატორის ალგზნებისათვის საჭირო— C ტევადობას შორის:

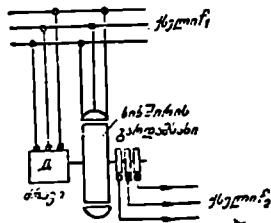
$$LC = \frac{1}{\omega^2}. \quad (38,1)$$

როდესაც $f = 50 \text{ Hz}$ -ს, ვღებულობთ $LC \approx 10^{-3}$

მას შემდეგ, რაც გენერატორი ალიგზნება, შესაძლებელია მისი დატვირთვა. დატვირთვის დროს, როდესაც $n = \text{const}$, გენერატორის მომჭვრებზე ადგილი ექნება სიხშირისა და ძაბვის მცირეოდენ ცვლილებას.



ნახ. 483. ასინქრონული გენერატორის თვითალგზნების პირობების გრაფიკული განსახილვერა ($U_1 = E_1$).



ნახ. 484. სიხშირის გარდამსახის სქემა.

კონდენსატორულმა თვითალგზნების გენერატორებმა ვერ ჰპოვა ფართო გავრცელება, ვინაიდან კონდენსატორების ღირებულება ასეთ დროს გამოდის საგრძობლად დიდი.

ბ) სიხშირის გარდამსახის რეჟიმში. ასინქრონული მანქანა ფაზური როტორით და რგოლებით შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას, როგორც ცვლადი დენის მაღალი სიხშირის გენერატორი.

ასეთი რეჟიმის შექმნისათვის მანქანის სტატორი ნორმალურად მიერთებულია ქსელთან, ხოლო როტორი ბრუნავს არც მიმართულების საწინააღმდეგოდ გარეშე ძრავის დახმარებით (ნახ. 484). როტორის გრაგნილი რგოლების საშუალებით გამოიყენება როგორც სამუაზა ცვლადი დენის წყარო¹.

დავეუშვათ, რომ როტორი ბრუნავს n_2 სიჩქარით, მაშინ მის გრაგნილში დაინდუქტირებულ ე. მ. ძ-ს ექნება სიხშირე

$$f_2 = \frac{(n_1 + n_2)p}{60} = s f_1, \quad (38,2)$$

ამასთან $s > 1$.

¹ საერთო შემთხვევაში m_2 ფაზური დენის.

როტორის გრაგნილისაგან გარეშე ქსელში გადაცემული სიმძლავრე ნაწილობრივ შექმნილია სტატორის მბრუნავი არეს მიერ, ნაწილობრივ კი იმ მექანიკური ენერჯიის გარდაქმნით, რომელსაც პირველადი ძრავი იძლევა. როტორის გრაგნილის ელექტრომაგნიტური სიმძლავრე ტოლია.

$$P_2 \dot{\varphi} = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2. \quad (38,3)$$

თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ $E_2 = E_1 s$, მივიღებთ

$$P_2 \dot{\varphi} = m_2 E_1 I_2 \cos \psi_2 + m_2 E_1 (s-1) I_2 \cos \psi_2 = P_{12} + P_{23} \quad (38,4)$$

ეს ტოლობა გვიჩვენებს, რომ მბრუნავი არეს მიერ როტორზე გადაცემული P_{12} სიმძლავრის ფარდობა ძრავისაგან ლილვით მიღებულ სიმძლავრესთან ტოლია:

$$\frac{P_{12}}{P_{23}} = \frac{1}{s-1}. \quad (38,5)$$

როდესაც $s=2$, $f_2=2f_1$, და $P_{12}=P_{23}$.

სიხშირის გარდამსახი გამოიყენება უმთავრესად ცვლადი დენის მისაღებად 100 Hz-ის სიხშირით მრეწველობის იმ დარგებში (ხის დამამუშავებელი, აბრეშუმის და სხვ.), სადაც საჭიროა ელექტრომომყვანი 3000 ბრ/წუთში და მეტი სიჩქარით.

გ) ორმაგი კვებას რეჟიმში. ორმაგი კვების რეჟიმს უწოდებენ ასინქრონული მანქანის მუშაობის ისეთ რეჟიმს, რომლის დროსაც სტატორისა და როტორის გრაგნილები შეერთებულია პარალელურად, ან მიმდევრობით და იკვებება ცვლადი დენის საერთო წყაროდან. ნახ. 485-ზე ნაჩვენებია გრაგნილების პარალელური შეერთების შემთხვევა.

განვიხილოთ პირობები, რომლის დროსაც ორმაგი კვების მანქანაში სტატორისა და როტორის გრაგნილების დამამაგნიტებელი ძალები უძრავია სივრცეში ერთიმეორის მიმართ.

თუ საერთო შემთხვევაში სტატორის დამამაგნიტებელი ძალა სივრცეში ბრუნავს n_1 სიჩქარით, ხოლო როტორის დამამაგნიტებელი ძალა როტორის მიმართ n_2 სიჩქარით და თვით როტორი n სიჩქარით, მაშინ სტატორისა და როტორის დამამაგნიტებელი ძალები ურთიერთ უძრავია, მხოლოდ მაშინ, როდესაც $n + n_2 = n_1$. ორმაგი კვების რეჟიმში $\pm n_1 = n_2$, ამასთან ნიშანი

(+) შეესაბამება სტატორისა და უძრავი როტორის დამამაგნიტებელი ძალების ბრუნვას თანხედენილი მიმართულებით, ხოლო ნიშანი (-) მათ ბრუნვას სხვადასხვა მიმართულებით. ამიტომ

$$n = n_1 - (\pm n_2). \quad (38,6)$$

ამ ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ სტატორისა და როტორის გრაგნილების ერთი და იგივე სიხშირის დენებით ერთდროული კვების შემ-

თხვევაში მათი დამამაგნიტებელი ძალები ურთიერთ უძრავია, მხოლოდ უძრავი როტორის შემთხვევაში ($n=0$), ან როტორის ბრუნვის შემთხვევაში სტატორის დამამაგნიტებელი ძალის მიმართულებით ორმაგი სინქრონული სიჩქარით ($n=2n_1$). პირველ შემთხვევას ადგილი აქვს $n_2 = +n_1$ -ის დროს, მეორეს, როდესაც $n_2 = -n_1$.

როდესაც $n=0$, ასინქრონული მანქანა ორმაგი კვების რეჟიმში წარმოადგენს მარეგულირებელ რეაქტიულ კოქსას, რომელიც განხილული იყო ნაწ. IV, § 27-ში.

როდესაც $n=2n_1$ ორმაგი კვების მანქანა მუშაობს როგორც სინქრონული, ვინაიდან დატვირთვისაგან დამოუკიდებლად როტორის სიჩქარე რჩება მუდმივი და ტოლი $2n_1$ -ის.

განვიხილოთ ეს რეჟიმი უფრო დეტალურად.¹

დავუშვათ, რომ სტატორისა და როტორის გრაგნილების პარამეტრები ერთნაირია. $L_{11} \approx L_{22}$ -ით აღენიშნოთ სტატორისა და როტორის ფაზის სრული ინდუქტიობა, ხოლო $M_{12} = M_{21}$ -ით მბრუნავი არეგებით გაპირობებული ურთიერთ ინდუქტიობა (ნაწ. IV, § 29). მაშინ სტატორისა და როტორის გრაგნილისათვის მათი პარალელური შეერთების შემთხვევაში, თუ ფოლადში დანაკარგებს უგულებელვყავთ, შეიძლება დავწეროთ:

$$\dot{U}_1 = j\omega_1 L_{11} \dot{I}_1 + j\omega_1 M_{12} \dot{I}_2 e^{-j\beta} + \dot{I}_1 r_1 \quad (38,7)$$

$$\dot{U}_2 = j\omega_1 L_{22} \dot{I}_2 + j\omega_1 M_{21} \dot{I}_1 e^{-j\beta} + \dot{I}_2 r_2 \quad (38,8)$$

სტატორისა და როტორის პარამეტრების იგივეობის გამო $I_1 = I_2$. (38,7) და (38,8) ტოლობებში კუთხე β აღრიცხავს სტატორისა და როტორის დამამაგნიტებელი ძალების პირველ პარამონიკებს შორის სიფრცულ ძვრას რომელიც, როგორც ეს ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, იცვლება მანქანის დატვირთვის ცვლილებით, იზრდება რა მისი ზრდით.

(38,7) და (38,8) ტოლობები შესაძლებელია შეცვლილ იქნეს, როგორც სტატორის, ისე როტორის წრედისათვის სამართლიანი ერთი განტოლებით:

$$U_1 = I_1 [r_1 + j\omega_1 (L_{11} - M_{12}) + j\omega_1 M_{12} (1 + e^{-j\beta})] = I_1 [Z_1 + X'_{12} (1 + e^{-j\beta})]. \quad (38,9)$$

აქ $L_{11} - M_{12}$ ინდუქტიობა მიღებულია ფანტეის ინდუქტიობის ტოლად (ნაწ. IV, § 29):

$$\omega_1 (L_{11} - M_{12}) = x_1; \quad r_1 + jx_1 = Z_1; \quad j\omega_1 M_{12} = x'_{12}.$$

ორმაგი კვების მანქანის დამაგნიტების დენი ტოლია სტატორისა და როტორის დამაგნიტების დენების ჯამის.

$$\dot{I}'_{or} = 2\dot{I}_o = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 e^{-j\beta} = \dot{I}_1 (1 + e^{-j\beta}). \quad (38,10)$$

(38,9) და (38,10)-დან გამომდინარეობს

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}'_{or} X'_{12} = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_o X'_{12} \quad (38,11)$$

¹ სინქრონულად მომუშავე ორმხრივი კვების ასინქრონული მანქანა წამოყენებული იყო კლოსის მიერ 1899 წელს.

სადაც X_{12} — ერთ წრედს შეფარდებული დამაგნიტების წინააღმდეგობაა, რომელიც სტატორისა და როტორის წრედების პარალელური შეერთების დროს ტოლია ორივე წრედების x_{12}' წინააღმდეგობის გაორკეცებული მნიშვნელობის: $X_{12} = 2X_{12}'$.

ორმაგი კვების რეჟიმისათვის (38,10) და (38,11) ტოლობების შესაბამისი ვექტორული დიაგრამა მოყვანილია ნახ. 486-ზე.

ვექტორული დიაგრამიდან გამომდინარეობს, რომ მანქანის ორივე წრედის საერთო ელექტრომაგნიტური სიმძლავრე ტოლია:

$$P_{\beta} = 2m_1 E_1 I_1 \sin \frac{\beta}{2} = 2m_1 I_0 r x_{12} I_1 \sin \frac{\beta}{2} = 2m_1 I^2 x_{12} \sin \frac{\beta}{2} \cdot \cos \frac{\beta}{2} = m_1 I_1^2 x_{12} \sin \beta. \quad (38,12)$$

ქსელიდან მიღებული სრული დენი ტოლია $I = I_1 + I_2 = 2I_1$, ამიტომ

$$P_{\beta} = \frac{1}{4} m_1 I^2 x_{12} \sin \beta. \quad (38,13)$$

(38,13)-დან შესაძლებელია მოენახოთ ბრუნვის მომენტი

$$M = P_{\beta} \frac{15}{\pi n_1} = \frac{1,19 m_1 I^2 x_{12} \sin \beta}{n_1}. \quad (38,14)$$

ორმაგი კვების მანქანის ძრავული რეჟიმის დროს, როდესაც $\beta < \pi$, ელექტრომაგნიტური სიმძლავრის ნაწილი იხარჯება ფოლადში დანაკარგების დასაძლევად, ხოლო დანარჩენი ნაწილი ძრავის ლილვზე გარდაიქმნება მექანიკურ სიმძლავრეში. როდესაც $2\pi > \beta > \pi$ ადგილი აქვს გენერატორულ რეჟიმს ($\sin \beta < 0$).

ნახ. 486-ის ვექტორული დიაგრამის საფუძველზე შესაძლებელია აიგოს ორმაგი კვების მანქანის სტატორისა და როტორის წრედებისათვის შენაცვლების სქემა. შენაცვლების სქემა მოყვანილია ნახ. 487-ზე. R აქტიური წინააღმდეგობა, რომელშიაც გადის დენი $|I_1 - I_0| = I_1 \sin \frac{\beta}{2}$, თუ ამ წინააღმდეგობაში დანაკარგებს გაუტოლებთ P_{β} ელექტრომაგნიტური სიმძლავრის ნახევარს, განისაზღვრება:

$$m_1 R \cdot I_1^2 \sin^2 \frac{\beta}{2} = \frac{1}{2} m_1 I_1^2 x_{12} \sin \beta,$$

საიდანაც

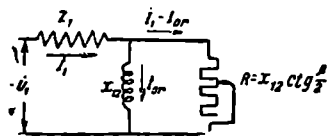
$$R = \frac{1}{2} x_{12} \frac{\sin \beta}{\sin^2 \frac{\beta}{2}} = x_{12} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}. \quad (38,15)$$

ნახ. 487-ის შენაცვლების სქემას შეესაბამება ნახ. 488-ზე მოყვანილი დენის წრიული დიაგრამა.

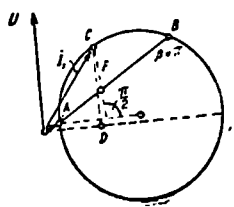
წრიული დიაგრამის აგება ხდება შენაცვლების სქემებისათვის წრიული დიაგრამების აგების საერთო მეთოდების საფუძველზე. P_3 ელექტრომაგნიტური სიმძლავრის ხაზი გადის $A(\beta=0)$ და $B(\beta=\pi)$ წერტილებზე, რომლებსათვისაც $P_3=0$.

I_1 დენის ვექტორის ნებისმიერი მდებარეობისათვის წრიული დიაგრამიდან შეიძლება კსელიდან მოთხოვნილი სიმძლავრის განსაზღვრა:

$$P = 2m_1 U_1 \overline{CD} \quad (38, 16)$$



ნახ. 487.



ნახ. 488.

და ელექტრომაგნიტური სიმძლავრე

$$P_3 = 2m_1 U_1 \overline{CF}, \quad (38, 17)$$

თუ \overline{CD} და \overline{CF} მონაკვეთებს გავზომავთ დენის მასშტაბში.

წრიული დიაგრამის ის ნაწილი, რომელიც მდებარეობს AB ხაზის ქვევით, შეესაბამება ორმაგი კვების მანქანას გენერატორულ რეჟიმს. მდგრადი მუშაობის ზღვარი განისაზღვრება მაქსიმალური ელექტრომაგნიტური სიმძლავრეებით ძრავულ და გენერატორულ რეჟიმებში (ნაა. 488).

ორმხრივი კვების ასინქრონული მანქანა, მიუხედავად, შედარებით მალალი $\cos \varphi$ ¹ გავრცელებულია სპეციალურ დანადგარებში. მის ძირითად ნაკლს წარმოადგენს გაშვების სირთულე, რომლის დროსაც საჭიროა მანქანის სიჩქარის განვითარება ორმაგ სინქრონულ სიჩქარეზე. გარდა ამისა, ორმაგი კვების მანქანა ადვილად ემორჩილება რყევებს (ნაწ. V, § 54).

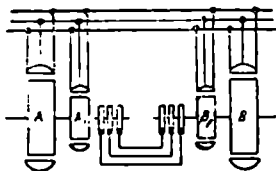
ორმაგი კვების დროს გარდა სინქრონული რეჟიმისა, შესაძლებელია აგრეთვე ასინქრონული რეჟიმები, რომლებიც პირველად გამოკვლეული იყო პროფ. ვ. ა. ტოლუნისკის მიერ. ამ შემთხვევაში მანქანაში მოქმედებს ორი დამოუკიდებელი მომენტი, რომლებისაგანაც ერთი შექმნილია სტატორში მიწოდებული ენერგიის ხარჯზე, ხოლო მეორე როტორში მიწოდებულ ენერგიის ხარჯზე. ამ რეჟიმებმა პრაქტიკული გავრცელება ვერ ჰპოვეს.

დ) ელექტრული ლილვის რეჟიმი. პრაქტიკაში ხშირად იქმნება ერთიმეორისაგან საკმაოდ დიდი მანძილით დაცილებული შექანიზმების შეთანხმებული

¹ იმავე დამაგნიტების დენის დროს, რაც გვაქვს ჩვეულებრივი ასინქრონული მანქანის დროს, ორმაგი კვების მანქანას აქვს ორჯერ მეტი აქტიური დენი, ვინაიდან ის ორმაგი სიჩქარის დროს ანვითარებს ორმაგ აქტიურ სიმძლავრეს. ამას მიეყვარათ $\cos \varphi$ -ის გაუმჯობესებამდე.

ბრუნვის საპიროება (პორტალური ამწი. ქალაქდამმუშავებელი მანქანები და სხვ.) ამ მექანიზმების შეერთება მექანიკურად საერთო ლილვით ხშირად არა მიზანშეწონილია, ან შეუძლებელი. ასეთ შემთხვევებში იქმნება აუცილებლობა მექანიზმების ინდივიდუალურ მოწყვანში, ძრავების სინქრონულ ბრუნვით, ე. ი. მექანიზმების შეერთებაში ე. წ. „ელექტრული ლილვით“. ელექტრული ლილვი შესაძლებელია განხორციელებულ იქნას სინქრონული ძრავების საშუალებით, ან ორმაგი კვების რეჟიმში სინქრონულად მომუშავე ასინქრონული მანქანებით (ნაწ. IV, § 38).

აგრეთვე შესაძლებელია ორი ან რამდენიმე ასინქრონული მანქანის შეერთება ელექტრული ლილვით. მათი ასინქრონულ რეჟიმში მუშაობის



ნახ. 489.

დროსაც.

ასეთი ელექტრული ლილვის სიმენს-შუკერტის ფორმის მიერ წამოყენებული ერთ-ერთი სქემათაგანი, ნაჩვენებია ნახ. 489-ზე.

აქ A და B ასინქრონული ძრავებია, რომლებიც საპიროა შეერთდეს ელექტრული ლილვით, A_1 და B_1 —დამხმარე A და B ძრავებთან საერთო ლილვებზე მოთავსებული ასინქრონული მანქანებია. A_1 და B_1

მანქანების როტორები საკონტაქტო რგოლების საშუალებით შეერთებულია ერთმანეთის შემხვედრად. როდესაც A და B ძრავების მოძრაობა ზუსტად წეთანხმებულია A_1 და B_1 მანქანების როტორების წრედში მოქმედი ე. მ. ძ-ების ჯამი ნულის ტოლია, როტორის გრაგნილებში დენი არ მოქმედებს და ამიტომ დამხმარე მანქანების ბრუნვის მომენტები ნულის ტოლია.

თუ, მაგალითად, A ძრავის ლილვზე წინააღმდეგობის მომენტი გაიზრდება, მაშინ A_1 მანქანის როტორი B_1 მანქანის როტორისაგან დაიწყებს ჩამორჩენას; როტორების წრედში ე. მ. ძ-ბის წონასწორობა დაირღვევა; მათ გრაგნილებში გაივლის დენი, რომელიც A_1 და B_1 მანქანებში შექმნის ბრუნვის მომენტებს. A_1 მანქანის მბრუნავი მომენტი გააძლიერებს A ძრავის მომენტს, ხოლო B_1 მანქანის ბრუნვის მომენტი შეამცირებს მომენტს B ძრავის ლილვზე და ამით შენარჩუნებული ექნება A და B ძრავების სრიალის ტოლობა.

დავუშვათ, რომ A_1 და B_1 მანქანების მაგნიტური არეები ბრუნავს მათი როტორების ბრუნვის მიმართულებით და, რომ A_1 მანქანის როტორი α ელექტრული კუთხით ჩამორჩა B_1 მანქანის როტორის მიმართ.

როტორების ზუსტი შეთანხმებული ბრუნვის შემთხვევაში—მათ წრედში გამათანასწორებელი დენის თვალსაზრისით ეს ტოლფასია იმის, თითქოს A_1 მანქანის სტატორის ძაბვა წინ გასწრებულია α კუთხით B_1 მანქანის სტატორის ძაბვისაგან (ნახ. 490).

ელექტრული ლილვის რეჟიმში ორი დამხმარე ასინქრონული მანქანების მუშაობისათვის შენაცვლების სქემა ნაჩვენებია ნახ. 491-ზე.

$\frac{U'}{s}$ ძაბვა შეესაბამება პირველად წრედზე მიყვანილ რგოლებს შორის მოქმედ ძაბვას და $s=1$ (f_1 სიხშირე)—სრიალს
 თუ პირველი მანქანის ძაბვა უსწრებს მეორე მანქანის ძაბვას ე. ი. ტოლია $U_1 e^{j\alpha}$ -ს მაშინ ელექტრული სიმძლავრე პირველი მანქანიდან მეორეს გადაეცემა. როდესაც პირველი მანქანის ძაბვაა $U_1 e^{-j\alpha}$, მაშინ სიმძლავრის გადაცემა ხდება შებრუნებული მიმართულებით.

განვიხილოთ პირველი შემთხვევა, მასთან გამოვიღეთ ნახ. 492-ზე წარმოდგენილი გამარტივებული შენაცვლების სქემიდან. ამ სქემაში მიღებულია $r_1 \approx 0$ და Z_{12} წინააღმდეგობა გამორჩეულია პირველად მომკერებზე. ექვტორული დიագრამა ნახ. 492-ზე ნაჩვენებია შენაცვლების სქემისათვის მოყვანილია ნახ. 493-ზე.

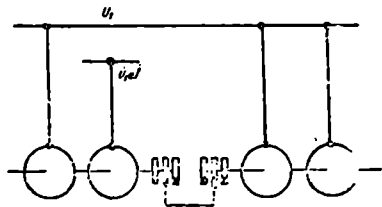
პირველი მანქანის სტატორიდან როტორზე გადაცემული P_{12} ელექტრომაგნიტური სიმძლავრე ნაწილობრივ იხარჯება როტორში ჯოულის დანაკარგებზე ($m_1 I_2'^2 r_2$), ნაწილობრივ გარდაიქმნება ლილვზე მექანიკურ ძრავულ სიმძლავრეში

$$\left(m_1 I_2'^2 r_2 \frac{1-s}{s} \right),$$

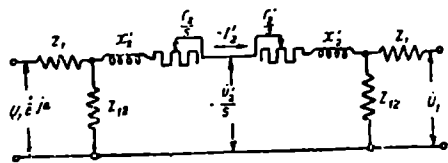
ხოლო დანარჩენი ნაწილი

$$\left(m_1 \frac{U'}{s} I_2 \cos \varphi \right)$$

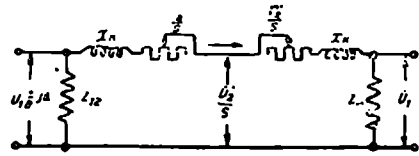
ლი სიმძლავრის სახით გადაეცემა მეორე მანქანის როტორს. მეორე მანქანის როტორში მოსული სიმძლავრე ნაწილობრივ იხარჯება ჯოულის დანაკარგებში ($m_2 I_1'^2 r_1$), ნაწილობრივ გარდაიქმნება ლილვზე მექანიკურ მუხრუ-



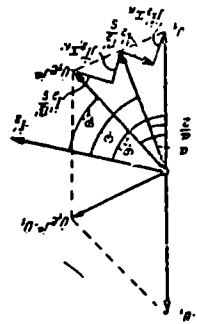
ნახ. 490.



ნახ. 491.



ნახ. 492.



ნახ. 493.

ქულ სიმძლავრეში $\left(m_2 I_1'^2 r_1 \frac{1-s}{s} \right)$, ხოლო დანარჩენი $m_2 U_1 I_1' \cos \varphi_2$ უბრუნდება

ბა ქსელს.

A_1 და B_1 მანქანების ელექტრომაგნიტური სიმძლავრეები ტოლია:

$$P_{12} = m_1 \left(\frac{U'_2}{s} I'_2 \cos \varphi \pm I_2^{12} \frac{r'_2}{s} \right), \quad (39,18)$$

სადაც ნიშანი (+) შეესაბამება სიმძლავრის გადაცემას სტატორიდან როტორზე, ხოლო ნიშანი (-) — გადაცემას როტორიდან სტატორზე.

შესაბამისად ამისა A_1 და B_1 მანქანების ბრუნვის მომენტები ტოლია:

$$M = \frac{m}{\omega_1} \left(\frac{U'_2}{s} I'_2 \cos \varphi \pm I_2^{12} \frac{r'_2}{s} \right). \quad (38,19)$$

ნახ. 493-დან გამომდინარეობს:

$$I'_2 = \frac{U_1 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{x_k^2 + \left(\frac{r'_2}{s}\right)^2}} = \frac{U_1 \sin \frac{\alpha}{2}}{x_k \sqrt{1 + \left(\frac{s_m}{s}\right)^2}}, \quad (38,20)$$

სადაც თანახმად (32,9)-ის $s_m \approx \frac{r'_2}{x_k}$.

გარდა ამისა

$$\frac{U'_2}{s} = U_1 \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (38,21)$$

და

$$\cos \varphi = \frac{x_k}{\sqrt{x_k^2 + \left(\frac{r'_2}{s}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{s_m}{s}\right)^2}}. \quad (38,22)$$

ჩავსვათ რა (38,20) — (38,22)-დან I'_2 , $\frac{U'_2}{s}$ და $\cos \varphi$ მნიშვნელობებს (38,19)-ში და მოვახდენთ მარტივ გარდაქმნებს, მივიღებთ:

$$M = M_m \frac{\frac{s}{s_m} \sin \alpha \pm (1 - \cos \alpha)}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}}, \quad (38,23)$$

სადაც M_m — A_1 და B_1 მანქანების მაქსიმალური მომენტია მათი ცალკეულად ნორმალური მუშაობის შემთხვევაში და (32,10)-ის თანახმად, უდრის:

$$M_m \approx \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 x_k}. \quad (38,24)$$

ნახ. 494-ზე ნაჩვენებია დამხმარე მანქანების $\frac{M}{M_m}$ და $\frac{M'}{M_m}$ ბრუნ-

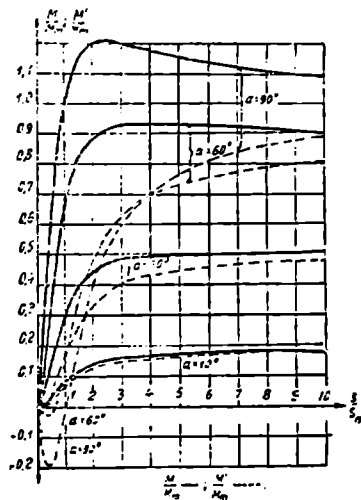
ვის მომენტების დამოკიდებულება $\left(\frac{S}{S_m}\right)$ სრიალისაგან როტორების სხვადა-

სხვა α კუთხით ძვრის შემთხვევაში, ამასთან (38,23)-ში M შეესაბამება (+) ნიშანს, ხოლო M' (-) ნიშანს.

ნახ. 494-დან ჩანს, რომ M და M' მომენტები, რომლებიც იჭერენ ბრუნვის ურთიერთ სინქრონიზმს, დიდი მნიშვნელობისაა მხოლოდ სრიალის დიდი სიდიდეებისათვის. ამიტომ ელექტრული ლილვის განხილულ სქემაში დამხმარე მანქანები ზრუნავს ჩვეულებრივად არეს საწინააღმდეგოდ და სპეციალურად ამ რეჟიმისათვისაა გათვლილი. გარდა ამისა, სრიალის გაზრდის მიზნით მათი პოლუსთა რიცხვი შესაძლებელია განსხვავებული იყოს მთავარი ძრავების პოლუსთა რიცხვისაგან.

მთავარი ძრავების გარეშე დამხმარე მანქანებს მუშაობა არ წეუძლიათ, ვინაიდან, როდესაც $\alpha=0$, როგორც (38,29)-დან ჩანს, მათი ბრუნვის მომენტი ნულის ტოლია.

ელექტრული ლილვის განხორციელება შესაძლებელია აგრეთვე ნახ. 495-ზე ნაჩვენები სქემის მიხედვით. მხოლოდ ამ სქემით ურთიერთ სინქრონიზმის დაცვა შესაძლებელია მარტო დიდი დატვირთვების შემთხვევა-

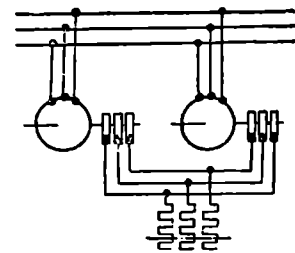


ნახ. 494. დამხმარე მანქანების M და M' ბრუნვის მომენტების დამოკიდებულება სრიალისაგან ვექტორების სხვადასხვა α კუთხით დაძვრის შემთხვევაში.

ში და როტორების წრედში ჩართული რეოსტატის წინააღმდეგობაში საგრძნობი დანაკარგების დროს, რაც შეეერთად ამცირებს ელექტრული ლილვის მ. კ. ა.¹

39. ასინქრონული ძრავის მუშაობა ანომალურ პირობებში

ელექტრულ დანადგარებში ასინქრონულ ძრავებს ხშირად უხდება ისეთ პირობებში მუშაობა, რომლებიც განსხვავდება ძრავის მონაცენების ნომინალური სიდიდეებისაგან.



ნახ. 495. ელექტრული ლილვის სქემა დამხმარე მანქანების გარეშე.

¹ უფრო დაწვრილებით ეს სქემა განხილულია ი. მ. სადოვსკის მიერ ჟურნალ „Электри-
чество“-ში № 22, 1935 წ.

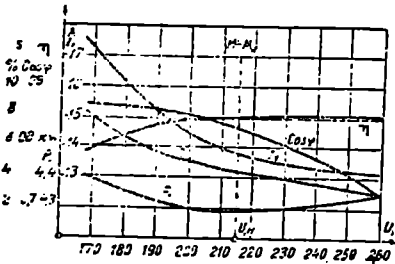
ექსპლატაციისათვის ყველაზე სახასიათო რეჟიმებს წარმოადგენს რეჟიმები, როდესაც $U_1 \approx U_{1H}$, პირველადი ძაბვა არასიმეტრიულია, როდესაც $f_1 \approx f_{1H}$ და, როდესაც როტორის წრედში გვაქვს ასიმეტრიულობა.

1. ასინქრონული ძრავის მუშაობა, როდესაც $U_1 \approx U_{1H}$ ასინქრონული ძრავის მუშაობაზე პირველადი ძრავის რყევის გავლენის ანალიზის დროს საჭიროა მხედველობაში მივიღოთ შემდეგი ფაქტორები:

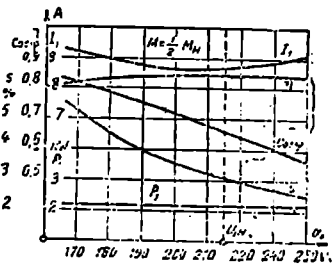
1. ძრავის რყევის დროს იცვლება ძრავის გაჟღენთა. ეს იწვევს დამაგნიტების დენის ცვალებადობას, რომელიც უფრო სწრაფად იზრდება, ვიდრე იზრდება ძაბვა. გაჟღენთა გავლენას ახდენს აგრეთვე ფანტვის ინდუქტიობაზე, რომელიც მცირდება გაჟღენთის ზრდის დროს (ნაწ. IV § 34).

2. ძრავის ბრუნვის მომენტი იცვლება ძაბვის კვადრატის პროპორციულად. ეს დამოკიდებულება სრულიად ზუსტად არაა დაცული, ვინაიდან მომენტი, გარდა ამისა, დამოკიდებულია ფანტვის ინდუქტიური წინააღმდეგობისაგან, რომელიც იცვლება ძაბვასთან ერთად.

სტატორის მოქმედებზე მოქმედ ძაბვასა და ძრავის მუშა მახასიათებლებს შორის არა გვაქვს მარტივი ანალიზური დამოკიდებულება, მაგრამ ძრავის თვისებები ნებისმიერი ძაბვებისათვის ადვილად შეიძლება გამოკვლეული იყოს ნაწ. IV, § 32-ში აღწერილი მეთოდით, ან წრიული დიაგრამების



ნახ. 496.



ნახ. 497.

დახმარებით ნაწ. IV, § 34-ის თანახმად. ამისათვის საჭიროა ვიცოდეთ x_1 , x_2 და Z_{12} სიდიდეები ძაბვის მოცემული მნიშვნელობისათვის (გაჟღენთა).

მაგალითისათვის განვიხილოთ სამუშაო ძრავი სიმძლავრით $3,7 \text{ kW}$, 215 V , $2p=6$, $f=50 \text{ Hz}$. ნახ. 496-ზე ნაჩვენებია დამოკიდებულებები I_1 , P_1 , $\cos \phi_1$, η და ηU_1 ძაბვისაგან, როდესაც ბრუნვის მომენტი მუდმივი სიდიდისაა $M = M_H$ ნახ. 497-ზე ნაჩვენებია იგივე დამოკიდებულებები

$$M = \frac{1}{2} M_H \text{-ის შემთხვევაში.}$$

ნახ. 497-ის მრუდებიდან შეიძლება გამოვავლინოთ ასინქრონული ძრავისათვის მეტად დამახასიათებელი თვისება მცირე დატვირთვებისა და შემცირებული ძაბვის ქვეშ ასწიოს $\cos \phi_1$.

ამით ხშირად სარგებლობენ იმ ძრავების ექსპლუატაციის დროს, რომლებიც საშუალებას ვეძღვებიან გადაერთოთ სტატორის გრაგნილი სამკუთხა შეერთებიდან ვარსკვლავზე. მცირე—40—50%-ზე დაბალი დატვირთვებისათვის ძრავის სტატორის გრაგნილს, რომელიც ნორმალურად სამკუთხურადაა შეერთებული, გადართავენ ვარსკვლავად. ასეთ დროს ფაზური ძაბვა მცირდება $\sqrt{3}$ -ჯერ, რაც საგრძნობლად აუმჯობესებს ძრავის მუშა მახასიათებლებს, როგორც ეს ჩანს ცხრ. 25-დან, რომელიც ეკუთვნის სამფაზა ძრავს 15 კW სიმძლავრით.

პირველადი ძაბვის ხანმოკლე რამოდენიმე წამის განმავლობაში შემცირების დროს მაგალითად, მოკლედ შეერთვის შედეგად, დიდად დატვირთული ასინქრონული ძრავებისათვის შესამჩნევია დენისა და სრიალის მკვეთრი ზრდა (ნახ. 496); ეს მოვლენა აიხსნება იმ გარემოებით, რომ შემცირებული ძაბვის დროს ძრავი ცდილობს გადალახოს პირვანდელი წინააღმდეგობის მომენტი. ამ შემთხვევაში ხშირად მოქმედებს მაქსიმალური დაცვა (დროის დაყოვნებით) და გამორთავს ძრავს ქსელიდან. ძაბვის ძლიერი დაცემის დროს შესაძლებელია ძრავის სრული გაჩერება.

2. ასინქრონული ძრავის მუშაობა, თუ პირველადი ძაბვა არასიმეტრიულია. როდესაც სამფაზა ქსელიდან იკვებება დიდი სიმძლავრის ერთფაზა მომხმარებლები, მაგალითად, ელექტროლუმენები, ან ადგილი აქვს აგარიულ შემთხვევას, შესაძლებელია შეიქმნას ხაზური ძაბვების სიმეტრიულობის საგრძნობი დამახინჯება.

ვისარგებლოთ სიმეტრიული მდგენელების მეთოდით და განვიხილოთ ასინქრონული გავლენა ასინქრონული ძრავის მუშაობაზე.

პირველადი ხაზური ძაბვების არასიმეტრიული ჩაკეტილი სისტემა საერთო შემთხვევაში შესაძლებელია დაშლილი იქნეს ძაბვის ორი პირდაპირი და უკუმიმდევრობის სიმეტრიულ სისტემად.¹

უგულებელვყოფთ რა გაქვინთას, ძრავის მუშა მახასიათებლების მიღება არასიმეტრიული ძაბვის დროს შესაძლებელია სუპერპოზიციის მეთოდით, თუ

¹ პირდაპირ და უკუ სისტემებად დაშლა ანალიზურად მეტად მარტივად შესაძლებელია შემდეგი მეთოდით. თუ a, b, c , — არასიმეტრიული სისტემის ძაბვების მნიშვნელობებია, მაშინ, განვსაზღვრავთ რა $S = a + b + c$, $A = \frac{1}{6}(a^2 + b^2 + c^2)$ და $B = \frac{1}{6}\sqrt{3S(S-2a)(S-2b)(S-2c)}$,

მოვძებნით პირდაპირი მიმდევრობის ძაბვას $D = \sqrt{A+B}$, შებრუნებული მიმდევრობის ძაბვას $E = \sqrt{A-B}$ და არასიმეტრიულობის კოეფიციენტს $\frac{E}{D} = \sqrt{\frac{A-B}{A+B}}$.

ცხრილი 25

$\frac{M}{M_{\Sigma}}$	სტატორის გრაგნილების შეერთება.	P_1 კW	$I_1 A$ ხაზური	cosφ ₁	
1/4	Δ	5,22	24,5	0,51	0,72
	λ	4,41	12,0	0,85	0,85
1/2	Δ	8,73	30	0,7	0,86
	λ	8,52	23	0,91	0,83

ჩვეთვლით, რომ ძრავის მომკერებზე მოქმედებს ერთი მეორისაგან დამოუკიდებლად ძაბვების პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის სიმეტრიული სისტემები.

ძაბვების პირდაპირი მიმდევრობის სისტემა ქმნის სტატორისა და როტორის გრაგნილებში პირდაპირი მიმდევრობის დენებს, რომლებიც ქმნის როტორის ბრუნვის მიმართულებით მბრუნავ არეს.

ძაბვების უკუმიმდევრობის სისტემა ქმნის სტატორისა და როტორის გრაგნილებში შებრუნებული მიმდევრობის დენებს, ამ დენებით გაპირობებულია უკუ მბრუნავი მაგნიტური არე, რომლის მიმართაც როტორს აქვს სრიალი $1+(1-s)-2-s$ და ამიტომ მუშაობს მუხრუქულ რეჟიმში.

პირდაპირი და უკუ არეების შეკრება მანქანის საპაერო ღრეჩოში გვაძლევს ელიპტიური სახის მბრუნავ არეს.

დაეუშვათ, რომ ფაზური ძაბვა და სტატორისა და როტორის პირდაპირი მიმდევრობის დენები შესაბამისად ტოლია U_{11}, I_{11}, I'_{21} .

მაშინ (31,18) და (32,7)-ის თანახმად

$$I'_{21} = \frac{U_{11}}{\sqrt{\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2}}, \quad (39,1)$$

$$M_1 = \frac{m_1 U_{11}^2 r'_2}{s \omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2 \right]}. \quad (39,2)$$

ანალოგიურად, უკუმიმდევრობის სისტემის შესაბამისი სიდიდეებისათვის მივიღოთ, თუ მათ აღვნიშნავთ ინდექსით 2;

$$I'_{22} = \frac{U_{12}}{\sqrt{\left(r_1 + c_1 \frac{r''_2}{2-s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x''_2)^2}}, \quad (39,3)$$

$$M_2 = - \frac{m_1 U_{12}^2 r''_2}{(2-s) \omega_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r''_2}{2-s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x''_2)^2 \right]}. \quad (39,4)$$

უარყოფითი ნიშანი (39,28) განტოლების მარჯვენა მხარეში გვიჩვენებს ნას, რომ M_2 მომენტი წარმოადგენს დამამუხრუქებელს და მიმართულია როტორის ბრუნვის საწინააღმდეგოდ. რადგანაც $s \approx s_{\pi}$ -ის დროს უკუმიმდევრობის დენების სიხშირე როტორში ტოლია $f_{22} \approx 2f_1$, ამიტომ გრიგლური დენების გავლენის გამო ადგილი აქვს აქტიური წინააღმდეგობის ზრდას და ფანტის ინდუქტიური წინააღმდეგობის შემცირებას $r''_2 > r'_2$ და $x''_2 < x'_2$. განსაკუთრებით შესამჩნევია აქტიური წინააღმდეგობის ზრდა, რომელსაც შეუძლია მიაღწიოს $2 \div 3$ -ჯერად მნიშვნელობას. ძრავის მიერ განვითარებული რეზულტიური მომენტი ტოლია:

$$M = M_1 + M_2. \quad (39,5)$$

M_1 , M_2 და M მომენტების დამოკიდებულება სრიალისაგან ნაჩვენებია
 ·ნახ. 498-ზე იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $\frac{U_{12}}{U_{11}} = 0,5$.

სტატორის ფაზის რეზულტიური დენი სტატორის პირდაპირი და უკუ-
 მიმდევრობის დენების გეომეტრიული ჯამის ტოლია. მაგალითად A ფაზისა-
 თვის (31,10)-ის თანახმად გვაქვს:

$$I_{1A} = I_{11A} + I_{12A} = U_{11A} \frac{1 + Y_{12} Z'_{22}}{Z_1 + C_1 Z'_{22}} + U_{12A} \frac{1 + Y_{12} Z''_{22}}{Z_1 + C_1 Z''_{22}}, \quad (39,36)$$

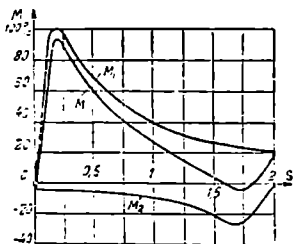
სადაც $Z''_{22} = \frac{r''_2}{2-s} + jx''_2$. B და C ფაზებისათვის გვაქვს სრულიად ანალო-
 გიური გამოსახულებები.

ვინაიდან უკუ მიმდევრობის სისტემისათვის (მუხრუქის რეჟიმი) დამაგ-
 ნიტების დენს არა აქვს არსებითი მნიშვნელობა, მით უფრო, რომ $U_{12} < U_{11}$,
 ამიტომ ანგარიშის სიმარტივისათვის უკუ მიმდევრობის სისტემისათვის C_1
 და Z_{12} სიდიდეებს ჩვეულებრივად იღებენ იმავე მნიშვნელობით, როგორც
 ესა გვაქვს პირდაპირი მიმდევრობის სისტემისათვის.

არასიმეტრიული ძაბვის დროს ასინქრონული ძრავის მუშაობის გამოკე-
 ლევისათვის პირდაპირი და უკუ სიმეტრიული სისტემისათვის შესაძლებელია
 გამოყენებული იქნეს ჩვეულებრივი შენაცვ-
 ლების სქემები. ასეთ დროს შენაცვლების
 სქემაში უკუ მიმდევრობისათვის Z'_{22} -ის
 ნაცვლად ჩაისმება სიდიდე Z''_{22} .

ქსელის ძაბვის ასიმეტრია სტატორის
 ფაზებში გვაძლევს სხვადასხვა სიდიდის
 ჯოულის დანაკარგებს, რომლებიც პროპორ-
 ციულია რეზულტიური დენების. პირიქით,
 როტორის ფაზებში ჯოულის დანაკარგები
 ერთნაირია, ვინაიდან როტორში პირდაპი-
 რი და უკუ მიმდევრობის დენებს სხვადა-
 სხვა სიხშირე აქვთ და, ნაშასადამე დანა-
 კარგები პროპორციულია ორივე მიმდევ-
 რობის დენების ეფექტური მნიშვნელობების
 კვადრატების ჯამის, რომელიც ყველა ფაზებისათვის ერთი და იგივეა.

ცდები და ანგარიში გვიჩვენებს, რომ ძრავის ერთი და იგივე სასარ-
 გებლო სიმძლავრისათვის პირველადი ძაბვის ასიმეტრიის შემთხვევაში ჯოუ-
 ლის დანაკარგები მეტია, ვიდრე სიმეტრიული სისტემის დროს. დანაკარგები
 ფოლადში აგრეთვე იზრდება უმთავრესად როტორში დანაკარგების ზრდის
 ხარჯზე, რადგანაც უკუ მიმდევრობის არესაგან როტორის გამაგნიტება—და-
 მაგნიტება წარმოებს $f_{22} \approx 2f_1$ სიხშირით. ამგვარად, შესაძლებელია მივიღეთ
 ·იმ დასკვნამდე, რომ პირველადი ძაბვის ასიმეტრია ამცირებს ძრავის სიმძ-



ნახ. 498. M_1 , M_2 , M ბრუნვის
 მომენტების დამოკიდებულება
 სრიალისაგან, როდესაც $\frac{U_{12}}{U_{11}} = 0,5$.

ლავრეს და სასარგებლო მომენტს, ადაბლებს მის მ. ქ. კ. და ქმნის როტორის საგრძნობი გადახურების საშეშროებას მასში დანაკარგების გაზრდის გამო.¹

ასინქრონული ძრავი პირველადი ასიმეტრიული ძაბვით მუშაობს დატვირთვის ქვეშ, თუ უქმად, ქსელში ქმნის გამაწონასწორებელ ეფექტს, ე. ი. ცდილობს შეამციროს ძაბვის ასიმეტრიულობა. ეს გარემოება იმით აიხსნება, რომ ძრავის უკუმიმდევრობის დენები ნაწილობრივ აკომპენსირებს ხაზში დატვირთვის უკუ მიმდევრობის დენებს. გამაწონასწორებელი ეფექტი ზით უფრო ძლიერია, რაც ნაკლებია ძრავის უკუ მიმდევრობის რეზულტიური წინააღმდეგობა.

3) ქსელის სიხშირის რყევის გავლენა ასინქრონული ძრავის მუშაობაზე. ექსპლოატაციის პირობებში ხშირია ქსელის სიხშირის რყევა. ეს რყევები ჩვეულებრივად არაა დიდი სიდიდის, მხოლოდ ავარიულ პირობებში მათ შეუძლიათ მიიღწიონ $f_{1\pm}$ ნომინალური მნიშვნელობის $\pm 5\%$ -ს, თუ სტატორის გრაგნილში ძაბვის ვარდნას უგულვებელყოფთ, მაშინ შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ $U \equiv f \Phi$. ამიტომ, თუ სიხშირის რყევების დროს ძაბვა U რჩება უცვლელი სიდიდის, მაშინ Φ მაგნიტური ნაკადი ძრავის საპაერო ღრეჩოში შეიცვლება სიხშირის უკუპროპორციულად. სიხშირის გაზრდით მანქანის მაგნიტური სისტემის გაქვინთა და დამაგნიტების დენი შემცირდება, ხოლო სიხშირის შემცირებით, პირიქით, გაიზრდება. სიხშირის პირდაპირ პროპორციულად შეიცვლება x_1 და x_2 ინდუქტიური წინააღმდეგობები და მაგნიტური არეს ბრუნვის სიჩქარე.

სიხშირის რყევები $\pm 5\%$ ფარგლებში შედარებით ნაკლებ გავლენას ახდენს ასინქრონული ძრავების მუშაობაზე. უფრო ზუსტად ამ მოვლენის შესწავლა შესაძლებელია ნაწ. IV, § 31 და 32-ში მოყვანილ შეფარდებების საშუალებით. ძრავის ბრუნვის სიჩქარის ცვლილება ქსელის სიხშირის ცვლის დროს განხილული იყო ნაწ. IV, § 37-ში.

4) როტორის ელექტრული წრედის ასიმეტრიის გავლენა ძრავის მუშაობაზე. როტორის ელექტრული წრედის ასიმეტრიულობა შესაძლებელია შეიქმნას სამუსო მოწყობილობის დაზიანების შედეგად (მუსების არა ერთნაირი დაწოლა სხვადასხვა რგოლებზე) ცუდი კონტაქტით და აგრეთვე როტორის ფაზების წინააღმდეგობის უთანაბრობის შედეგად.

უკანასკნელი შემთხვევა გვხვდება, როდესაც გამწვი და მარეგულირებელი რეოსტატების წინააღმდეგობები ცალკეული ფაზებისათვის სხვადასხვაა. ასეთი რეოსტატის მაგალითს, რომელიც ხშირადაა გამოყენებული, შეიძლება წარმოადგენდეს კალენბერგის მიერ წამოყენებული რეოსტატი (ნახ. 499).

ამ რეოსტატის უპირატესობას ჩვეულებრივთან შედარებით წარმოადგენს მისი გაბარიტული ზომებისა და ღირებულების შემცირება.

ასე მაგალითად, ნახ. 499-ზე ნაჩვენებ რეოსტატს აქვს 13 გამწვი საფე-

¹ ბოლო დროს გავრცელება მიიღო მოკლედ შერთული ძრავების გამწვი მომენტის შეზღუდვის მეთოდი (მათი მოდოვრე გაქანებისათვის). ამ მეთოდით ძრავის გამწვი მომენტის შემცირება მიღწეულია სტატორის ურთიერთ ფაზაში წინააღმდეგობის ჩართვით, რომელიც ამახინჯებს პირველადი ძაბვების სიმეტრიას და ამით იქმნება ინვერსიული არეს დამამაგნიტებელი მომენტი.

ბური 12 კონტაქტით მაშინ, როდესაც ნორმალურ სამფაზა რეოსტატს იგივე 13 საფეხურისათვის აქვს 42 კონტაქტი.

კალენბერგის რეოსტატის ნაკლს შეადგენს ის გარემოება, რომ რეოსტატის სახელურის განსაზღვრული მდებარეობისათვის როტორის ცალკეულ ფაზებში ჩართულია სხვადასხვა სიდიდის აქტიური წინააღმდეგობები.

განივილით, თუ რა გავლენას ახდენს ძრავის მუშაობაზე როტორის წრედის ასიმეტრია, როდესაც როტორი ჩართულია ვარსკვლავად.

ქსელის ძაბვის სიმეტრიის შემთხვევაში სტატორში მოქმედებენ ქსელის f_1 სიხშირის I_1 დენები.

როტორის წრედის ცალკეული ფაზების წინააღმდეგობების უტოლობის გამო დენები როტორის ფაზებში სხვადასხვა სიდიდისაა.

როტორის დენების ასიმეტრიული სისტემა შესაძლებელია დაიშალოს პირდაპირი I_{21} და უკუმიმდევრობის I_{22} სიმეტრიულ მდგენელებად. ნულოვანი მიმდევრობის დენები როტორის წრედში არ გვექნება.

როტორის პირდაპირი მიმდევრობის sf_1 სიხშირის I_{21} დენები ქმნის სივრცეში ω_1 კუთხური სიჩქარით მბრუნავ დამამაგნიტებელ ძალას, რომელიც უძრავია სტატორში I_1 დენებით შექმნილი დამამაგნიტებელი ძალის შიშართ.

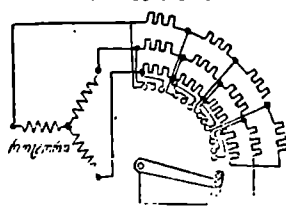
როტორის უკუმიმდევრობის sf_1 სიხშირის I_{22} დენები ქმნის როტორის მიმართ $\omega_2 = s\omega_1$ სიჩქარით მბრუნავ დამამაგნიტებელ ძალას, ხოლო სტატორის მიმართ ეს ძალა მოძრაობს სიჩქარით.

$$\omega_2 = \omega_2 - \omega_1 = \omega_1(1-s) - s\omega_1 = \omega_1(1-2s).$$

ეს არე სტატორის გრაგნილში აღძრავს ე. მ. ძ. და I_{13} დენებს სიხშირით $f_3 = (1-2s)/f_1$, რომლებიც იკვრება ქსელის საშუალებით და იკრიბება f_1 სიხშირის I_1 დენებთან.

ამგვარად, როტორის ფაზების ასიმეტრიულობის დროს ძრავში იქმნება ორი მბრუნავი მაგნიტური არე. პირველი შექმნილია I_1 და I_{21} დენების დამამაგნიტებელი ძალით, მეორე — I_{22} და I_{13} დენების დამამაგნიტებელი ძალით. თანახმად ზემოთ აღნიშნულისა ძრავის ბრუნვის რეზულტიური მომენტი ტოლია $M = M_1 + M_2$, ამასთან M_1 მომენტი შედგება პირველი არესა და როტორის I_{21} დენის ურთიერთმოქმედების, ხოლო მომენტი M_2 მეორე არესა და სტატორის I_{13} დენების ურთიერთქმედების.

$s > 0,5$ სრიალის დროს ω_2 კუთხური სიჩქარე უარყოფითი სიდიდისაა, ამიტომ $s > 0,5$ ისათვის მეორე არე სტატორის მიმართ მბრუნავს პირველი არეს საწინააღმდეგო მიმართულებით. ვინაიდან სტატორი უძრავია, ამიტომ M_2



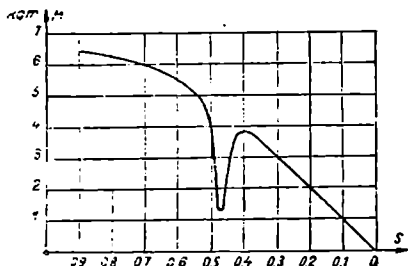
ნახ. 499.

ნომენტი ამ შემთხვევაში მიმართული იქნება არეს ბრუნვის საწინააღმდეგოდ და შეიკრიბება M_1 მომენტთან.¹

როდესაც $s=0,5$, კუთხური სიჩქარე $\omega_3=0$. მეორე არე სტატორის მიმართ უძრავია, რის გამოც $I_{13}=0$ და $M_2=0$.

თუ $s < 0,5$, კუთხური სიჩქარე $\omega_3 > 0$. მეორე არე ამ შემთხვევაში სტატორის მიმართ იმავე მიმართულებით ბრუნავს, როგორცაა როტორი. ნომენტი M_2 ამიტომ იცვლის თავის ნიშანს და ხდება დამაჩუხრუქებელი.

ნახ. 500-ზე მოცემულია ასინქრონული ძრავისათვის: 20,5 kV, 220 V, 1 500 ბრ/წთ ექსპერიმენტით მიღებული მომენტების მრუდი $M=f(s)$, რო-



ნახ. 500. მომენტის (M) დამოკიდებულება სრილისაგან (s), როტორის წრედში სხვადასხვა აქტიური წინააღმდეგობების ჩართვის დროს.

დესაც როტორის წრედში რეოსტატის აქტიური წინააღმდეგობები სხვადასხვაა და მეტია თვით გრაგნილის აქტიურ წინააღმდეგობებზე შესაბამისად 22,5; 2 და 11 ჯერ².

მომენტების მრუდში ცხადათაა გამოსახული როტორში უკუმიმდევრობის დენების არსებობით გამოწვეული ჩავარდნა ნახევარ ასინქრონული სიჩქარის ახლოს.

როტორის ელექტრული წრედების ასიმეტრიის კერძო შემთხვევას წარმოადგენს მისი

ერთი ფაზის გაწყვეტა, რომლის დროსაც როტორი ხდება ერთფაზა. ასეთი შემთხვევა შესაძლებელია ექსპლოატაციის დროს, თუ ერთ-ერთი მუსათაგანი არაა შეხებაში თავის საკონტაქტო რგოლთან.

ნახ. 501-ზე მოყვანილია ცდით მიღებული მრუდი $M=f(s)$ ასინქრონული ძრავის ერთფაზა როტორით მუშაობის შემთხვევაში. როგორც ჩანს მომენტების (1) მრუდს $s=0,5$ სიჩქარის დროს აქვს ჩავარდნა. როტორში შებრუნებული მიმართულების დენების არსებობის გამო.

როდესაც $0,5 > s > 0,33$ ბრუნვის მომენტი ხდება უარყოფითი. მომენტსა და სრილს შორის ასეთი დამოკიდებულების გამო ძრავს ერთფაზა როტორით გაქანების დროს არ შეუძლია მიაღწიოს ნორმალურ ბრუნვათა რიცხვს, ვინაიდან ის $s_1=0,5$ სიჩქარის დროს იმუშავებს მდგრადად წინააღმდეგობის მომენტის მოცეპული M_c მნიშვნელობისათვის.

¹ როგორც ცნობილია როტორის მხრიდან ასინქრონული ძრავის კვების დროს როტორი ბრუნავს არეს საწინააღმდეგო მიმართულებით.

² გ. ი. შტურმანი. მეორადი წრედების ასიმეტრია ასინქრონულ მანქანებში OITIE 1935 წ.

ძრავის ნომინალურ s_M სრიალზე გადაყვანისათვის საჭიროა მის ლილვს მოვდოთ დამატებითი M_2 მომენტი (ნახ. 501).

ამგვარად, ერთფაზა როტორის შემთხვევაში ძრავს შესაძლებელია ჰქონდეს ბრუნვის ორი მდგრადი სიჩქარე.

ამ მოვლენას, რომელიც პირველად აღწერილი იყო 1896 წ. გ. გიორგისის მიერ „გიორგისის მოვლენას“ უწოდებენ.

როტორის წრედის აქტიური წინააღმდეგობის გაზრდით შესაძლებელია შევამკიროთ I_{23} დენების გავლენა, როგორც ესა ჩანს ნახ. 501-ის მე-2 მრუდიდან, რომელიც ეკუთვნის იგივე ძრავს როტორში გაზრდილი აქტიური წინააღმდეგობებით.

§ 40. მართვაზა ასინქრონული ძრავი

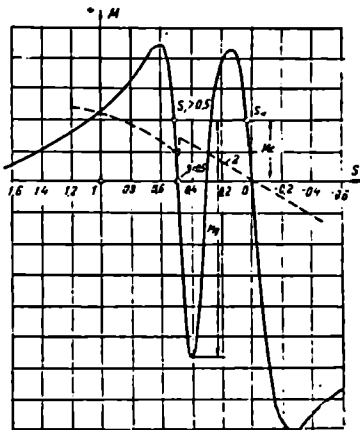
ბოლო დროს ერთფაზა ასინქრონულმა ძრავმა დიდი გავრცელება ჰპოვა ნიკიე კუსტარულ და საყოფაცხოვრებო დანადგარებში, რომლებიც ერთფაზა დენით იკვებება.

ერთფაზა ასინქრონულ ძრავს სტატორზე აქვს ერთფაზა გრაგნილი, რომელსაც ჩვეულებრივად დაკავებული აქვს საპოლუსო დანაყოფის $2/3$ (ნაწ. III, § 22). და მრავალფაზა როტორი ისევე, როგორც სამფაზა ძრავს, მოკლედ შერთული ციყვის ბორბლის სახით.

ხშირად სამფაზა ასინქრონული ძრავის გამოყენება ხდება როგორც ერთფაზასი, ამ შემთხვევაში სტატორის ერთი ფაზა გამოუყენებელი რჩება (ნახ. 502).

სტატორის გრაგნილში ერთფაზა დენის გავლის დროს წარმოიშეება პულსიური მაგნიტური არე. ძრავის მუშაობის გამოკვლევის მიზნით დავშალოთ ეს არე ორ თანაბარ სხვადასხვა მიმართულების სინქრონულად მბრუნავ არედ (ნაწ. III, § 24, ბ). თუ ძრავის როტორი უძრავია, მაშინ პირდაპირი და უკუსინქრონული არეების ურთიერთმოქმედებით როტორის დენთან ძრავის ლილვზე შეიქმნება ორი სხვადასხვა მიმართულების ტოლი მბრუნე მომენტი, რომლებიც ერთმანეთს აწონასწორებენ. ამიტომ ერთფაზა ძრავის საწყისი მბრუნე მომენტი, თუ მას არა აქვს სპეციალური გამწევი მოწყობილობები, ნულის ტოლია (ნახ. 503).

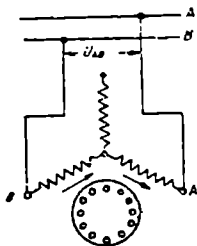
თუ ძრავს მოვიყვანთ მოძრაობაში ნებისმიერი მიმართულებით, მაშინ პირდაპირი არეს M'_1 მომენტი მეტი გახდება უკუ არეს M'_2 მომენტზე



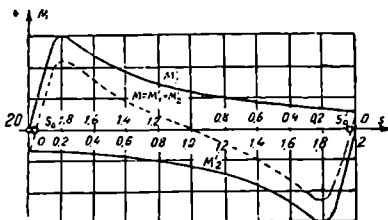
ნახ. 501. სამფაზა ასინქრონული ძრავის მბრუნევი მომენტის დამოკიდებულება სრიალისაგან, თუ როტორი ერთფაზაა.

(ნახ. 503) და ძრავი მიიღებს შესაძლებლობას დამოუკიდებლად განავითაროს ბრუნვითა რიცხვი, თუ ჯამური $M = M_1 + M_2$ მომენტი მეტია, ვიდრე მის ლილვზე წინააღმდეგობის მომენტი.

თავისი მუშა თვისებებით ერთფაზა ძრავი უახლოვდება პირველადი ძაბვებით ძლიერ დამახინჯებული სიმეტრიით მომუშავე (ნაწ. IV, § 39, დ)



ნახ. 502. სამფაზა ასინქრონული ძრავის ერთფაზა ჩართვა.



ნახ. 503. ერთფაზა ასინქრონული ძრავის მბრუნავი მომენტის (M) და მისი მდგენელების (M_1 და M_2) დამოუკიდებლულება სრიალისაგან.

სამფაზა ძრავს. ამიტომ ერთფაზა ძრავები თავისი მუშა მახასიათებლებით ჩამოუვარდება სამფაზა ძრავებს; მათ აქვთ უფრო დაბალი მ. კ. კ., სიმძლავრის კოეფიციენტი და მაქსიმალური ბრუნვის მომენტი.

როგორც ნახ. 503-დან ჩანს ერთფაზა ძრავს არა აქვს სამუხრუჭო რეჟიმი, ვინაიდან ნებისმიერი მიმართულებით ბრუნვის შემთხვევაში საწყის მომენტში ადგილი აქვს ძრავულ რეჟიმს, ხოლო $a < a_0 = a'_0$ სრიალის დროს გენერატორულს, სადაც a_0 და a'_0 სრიალის მნიშვნელობებია $M = 0$ შემთხვევისათვის. ჩვეულებრივად სრიალი $a_0 = a'_0$ და M მომენტი $a = 0$ -სათვის ნულთან ახლოსაა.

ა) ერთფაზა ასინქრონული ძრავის თეორია. ერთფაზა ასინქრონული ძრავის მუშაობა შესაძლებელია ადვილად იქნას გამოკვლეული სიმეტრიული მდგენელების მეთოდით.

როგორც ნახ. 502-დან ჩანს, ერთფაზა ძრავი შეგვიძლია განვიხილოთ, როგორც სამფაზა ძრავის კერძო შემთხვევა, რომლის სტატორის ერთ-ერთ ფაზაში დენის ძალა ნულის ტოლია ამ ფაზაში უსასრულო დიდი წინააღმდეგობის ჩართვის გამო.

ამიტომ შესაძლებელია დავწეროთ:

$$\dot{I}_{1A} = \dot{I}_{11A} + \dot{I}_{12A}; \quad (40,1)$$

$$\dot{I}_{1B} = a^2 \dot{I}_{11A} + a \dot{I}_{12A}; \quad (40,2)$$

$$\dot{I}_{1C} = a \dot{I}_{11A} + a^2 \dot{I}_{12A} = 0; \quad (40,3)$$

$$\dot{I}_{1A} + \dot{I}_{1B} + \dot{I}_{1C} = 0, \quad (40,4)$$

სადაც მეორე ინდექსები 1 და 2 აღნიშნავს პირდაპირ და შებრუნებულ მიმდევრობებს, ხოლო $a = e^{j \frac{2\pi}{3}}$.

ამ ტოლობების ერთდროული ამოხსნა მოგვცემს ყოველი ფაზის დენებსა და მათ პირდაპირ და უკუ მდგენელებს შორის დამოკიდებულებებს, რომლებიც მოცემულია ნახ. 504-ზე ნაჩვენები ვექტორული დიაგრამის სახით.

ძაბვები A და B ფაზების მომქერებზე ტოლია

$$\dot{U}_{1A} = \dot{U}_{11A} + \dot{U}_{12A} = \dot{I}_{11A} Z_{s1} + \dot{I}_{12A} Z_{s2}; \quad (40,5)$$

$$\dot{U}_{1B} = \dot{U}_{11B} + \dot{U}_{12B} = \dot{I}_{11B} Z_{s1} + \dot{I}_{12B} Z_{s2}, \quad (40,6)$$

სადაც Z_{s1} და Z_{s2} ძრავის პირდაპირი და უკუმომდევრობის სრული წინააღმდეგობებია მოცემული სრიალისათვის.

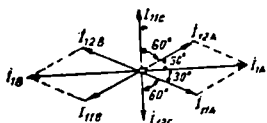
\dot{U}_{AB} ხაზური ძაბვა ძრავის მომქერებზე ტოლია:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{1A} - \dot{U}_{1B} = (\dot{I}_{11A} - \dot{I}_{11B}) Z_{s1} + (\dot{I}_{12A} - \dot{I}_{12B}) Z_{s2} \quad (40,7)$$

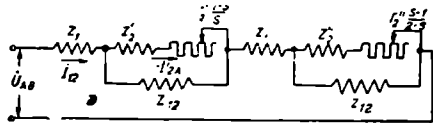
ან ნახ. 504-ის დიაგრამის თანახმად:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{I}_{1A} (Z_{s1} + Z_{s2}). \quad (40,8)$$

ეს ტოლობა გვიჩვენებს, რომ სამფაზა ძრავის ერთფაზა ჩართვისათვის შენაცვლების სქემა შესაძლებელია წარმოდგენილ იქნას სამფაზა ძრავის



ნახ. 504. პირდაპირი და უკუმომდევრობის დენების ვექტორული დიაგრამა.



ნახ. 505. სამფაზა ასინქრონული ძრავის ერთფაზა ჩართვის შემთხვევის ეკვივალენტური სქემა.

შემდევრობით შეერთებული ორი ჩვეულებრივი სქემის სახით (ნახ. 505), საიდანაც ერთი (Z_{s1}) შეესაბამება ძრავულ რეჟიმს, ხოლო მეორე (Z_{s2})—სამუხრუჭო რეჟიმს, რამდენადაც როტორის სრიალი უკუ არეს მიმართ ტოლია $1 + (1-s) = 2-s$.

ისევე როგორც სამფაზა ძრავის ასინქრონული ძაბვის ქვეშ მუშაობის დროს, ამ შემთხვევაშიაც $r''_2 > r'_2$ და $x''_2 < x'_2$. ეს იმით აიხსნება, რომ ნომინალური დატვირთვის დროს, როდესაც s სრიალი მცირეა, როტორში უკუმომდევრობის დენების სიხშირე უდრის სტატორის დენის სიხშირის თითქმის გაორკეცებულ მნიშვნელობას. ასეთი სიხშირის დროს საგრძნობლად იზრდება როტორის აქტიური წინააღმდეგობა და რამოდენიმედ მცირდება ფანტის ინდუქტიობა.

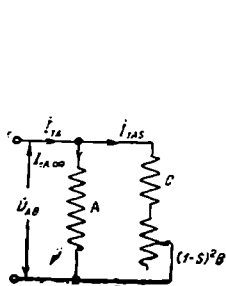
ნახ. 505-ზე მოცემული ეკვივალენტური სქემა საშუალებას გვაძლევს გამოვაკლიოთ ერთფაზა ასინქრონული ძრავის ყველა მუშა მახასიათებლები.

თუ ანგარიშის გამარტივებისათვის დაახლოებით დაეშვებით $r'_2 \approx r''_2$ და $x'_2 \approx x''_2$, მაშინ, გამოვალთ რა შენაცვლების სქემიდან, შესაძლებელია ზოგიერთი გარდაქმნების შემდეგ მივიღოთ

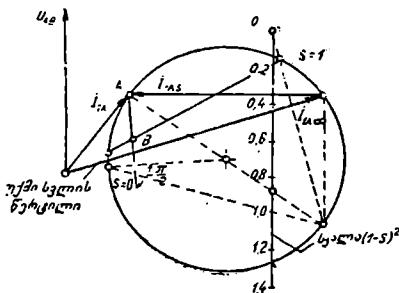
$$i_{1A} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{s1} + Z_{s2}} = \frac{\dot{U}_{AB}}{A} + \frac{\dot{U}_{AB}}{(1-s)^2 B + C}, \quad (40,9)$$

სადაც A , B და C — შენაცვლების სქემის პარამეტრების ფუნქციონალური წინააღმდეგობებია. თუ (40,9)-ში s სრიალს მივცემთ კერძო მნიშვნელობებს, ადვილად მივიღებთ A , B და C -ს მნიშვნელობებს.

როდესაც $s = \infty$, $I'_{1A\infty} = \frac{\dot{U}_{AB}}{A}$, მაშასადამე A ტოლია ძრავის წრედის წინააღმდეგობის $s = \infty$ -ის შემთხვევაში:



ნახ. 506.



ნახ. 507.

$$A = Z_{\infty} = \frac{1}{Y_{\infty}}. \quad (40,10)$$

თუ $s=1$, (40,9)-დან გვაქვს

$$i_{1A1} = \dot{U}_{AB} Y_k = \dot{U}_{AB} Y_{\infty} + \frac{\dot{U}_{AB}}{C},$$

საიდანაც

$$C = \frac{1}{Y_k - Y_{\infty}}. \quad (40,11)$$

ჩავთვლით რა $s=0$, ანალოგიურად მივიღებთ

$$B = \frac{1}{Y_0 - Y_{\infty}} - \frac{1}{Y_k - Y_{\infty}}, \quad (40,12)$$

სადაც

$$Y_0 = I'_{1A0} : \dot{U}_{AB}$$

(40,9) ტოლობა საშუალებას გვაძლევს ანგარიშისათვის რთული შენაცვლების სქემა, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 505-ზე, შევცვალოთ უფრო მარტივი ნახ. 506-ზე მოცემული შენაცვლების სქემით.

ამ შენაცვლების სქემიდან უშუალოდ გამომდინარეობს, რომ s სრიალის ცვლის დროსა და $\dot{U}_{AB} = \text{const} \cdot I_A$ დენის ვექტორის ბოლო გადაადგილება წრეხაზზე, ამასთან I_{1A} დენი შედგება უცვლელი $I_{1A\infty} = \dot{U}_{AB} X$ დენისა და

$$I_{1AS} = \frac{\dot{U}_{AB}}{(1-s)^2 B + C}, \quad (40,13)$$

დენისაგან, რომლის გადაადგილებაც ხდება წრეხაზზე (ნახ. 507). წრეხაზის დიამეტრი ტოლია I_{1A} დენის მაქსიმალური მნიშვნელობის და შეესაბამება $(1-s)^2 B + C$ წინააღმდეგობის მინიმალურ მნიშვნელობას.

ერთფაზა ძრავის წრიული დიაგრამის პრაქტიკული აგება მოსახერხებელია მოვხდინოთ ცდით განსაზღვრული უქმი სელისა და მოკლედ შერთვის წერტილებით და $s = \infty$ წერტილით, რომელიც განისაზღვრება მიახლოებითი შეფარლებიდან

$$Z_{\infty} \approx 0,5 r_k + jx_k.$$

ძრავის P_2 სასარგებლო სიმძლავრეების ხაზი ვადის უქმი სელისა და მოკლედ შერთვის წერტილებზე (ნახ. 507), სადაც ეს სიმძლავრე ნულის ტოლია. ამიტომ $P_2 = V_{AB} \cdot \overline{AB}$, თუ \overline{AB} მონაცემთს გაეზომავთ დენის მასშტაბში.

სამფაზა ძრავის ანალოგიურად, ძრავის ბრუნვის სიჩქარე მოიძებნება გრაფიკული აგებით, ასეთ დროს სრიალების სკალაზე განისაზღვრება $(1-s)^2$ მნიშვნელობა (ნახ. 507), რამდენადაც I_{1A} დენის განტოლებაში (40,9) $(1-s)^2$ წარმოადგენს ცვლად პარამეტრს. ძრავის ბრუნვის სასარგებლო მომენტი განისაზღვრება ანგარიშით:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_1(1-s)}. \quad (39,14)$$

ერთფაზა ძრავის წრიულ დიაგრამაში მომენტების ხაზი არ წარმოადგენს სწორ ხაზს, ამიტომ ის შეიძლება აგებული იქნეს მხოლოდ წერტილებით.

სამფაზა ძრავისაგან განსხვავებით ერთფაზა ძრავის ბრუნვის მომენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა დამოკიდებულია როტორის აქტიური წინააღმდეგობისაგან. ეს დამოკიდებულება ცხადად ჩანს ნახ. 508-დან¹. როტორის წინააღმდეგობის ზრდით იზრდება პირდაპირი და უკუ არეების სამუხრუკო მომენტები, რომლებიც ამცირებს M რეზულტიური მომენტის მაქსიმალურ მნიშვნელობებს.

¹ უნდა აღინიშნოს, რომ M'_1 და M'_2 მომენტების მრუდები განსხვავდება $M = f(s)$ მრუდებისაგან, რომლებიც გამოკლებული იყო § 32, როდესაც $U_1 = \text{const}$. ეს განსხვავება გამოწვეულია იმით, რომ ძაბვის სიდიდე Z_{s1} და Z_{s2} წინააღმდეგობებზე, როდესაც $U_{AB} = \text{const}$, დამოკიდებულია სრიალზე.

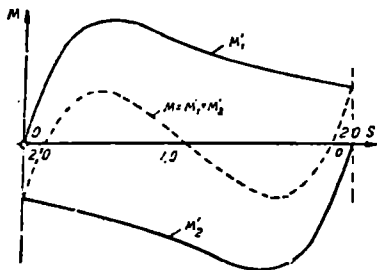
ძრავის ლილვზე ბრუნვის M რეზულტიური მომენტის სრიალისაგან დაშლილებულების მრუდის დაახლოებითი სახე, როდესაც როტორის r_2 აქტიური წინააღმდეგობა ცვალებადია, ნაჩვენებია ნახ. 509-ზე.

გარკვეულ თავისებურებას წარმოადგენს აგრეთვე ერთფაზა ძრავის უქმი სვლის რეჟიმი. თუ სამფაზა ძრავის უქმი სვლის ერთ-ერთ ფაზას გამოვრთავთ ქსელიდან და ძრავს გადავიყვანოთ ერთფაზა მუშაობის რეჟიმში, მაშინ უქმი სვლის დენი გაიზრდება, ვინაიდან ე. მ. ძ.-ის შექმნა, რომელიც აწონასწორებს მოდებულ ძაბვას, ამ შემთხვევაში უხდება არა სამი ფაზის, არამედ ორი ფაზის დამამაგნიტებელ ძალებს.

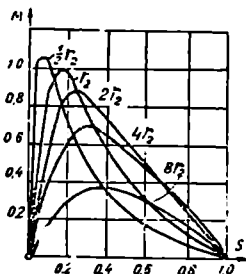
უქმი სვლის დენის ასეთი ზრდა შესაძლებელია განესაზღვროთ ნახ. 505-ის შენაცვლების სქემიდან.

სამფაზა რეჟიმში უქმი სვლის დენი ($r=0$) ტოლია

$$I_{1A} \approx \frac{\dot{U}_{1A}}{Z_1 + Z_{12}}; \quad (40,15)$$



ნახ. 503. ერთფაზა ძრავის მომენტის მრუდები როტორის წრედში დიდი აქტიური წინააღმდეგობის შემთხვევაში.



ნახ. 509.

ერთფაზა რეჟიმის დროს;

$$I_{1A} \approx \frac{\dot{U}_{AB}}{2Z_1 + Z_{12} + Z''_2} \approx \frac{\dot{U}_{AB}}{3Z_1 + Z_{12}}. \quad (40,16)$$

ვინაიდან $Z_{12} \gg Z_1$ და $U_{AB} = \sqrt{3} U_{1A}$, ამიტომ უქმი სვლის დენი სამფაზა რეჟიმიდან ერთფაზა რეჟიმზე გადასვლის დროს იზრდება მიახლოებით $\sqrt{3}$ -ჯერ.

სამფაზა ძრავისაგან განსხვავებით ერთფაზა ძრავის სტატორის დენი გახსნილი როტორის შემთხვევაში თითქმის ორჯერ ნაკლებია, ვიდრე უქმი სვლის დენი, რადგანაც გახსნილი როტორის შემთხვევაში სტატორის დენი არ შეიცავს უკუ სინქრონული არეს მიერ გააბირობებულ (როდესაც $r=0$) როტორის დენის გამაწონასწორებელ მდგენელს.

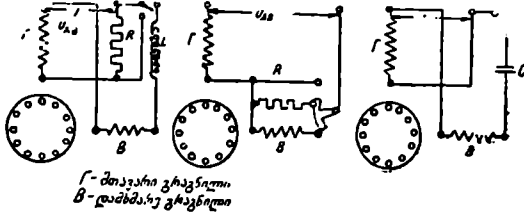
ნახ. 505-ის შენაცვლების სქემიდან გამოვლინარეობს, რომ გახსნილი როტორის შემთხვევაში ($r'_2 = r''_2 = \infty$) სტატორის დენის ტოლია:

$$I_{1A} = \frac{\dot{U}_{AB}}{2(Z_1 + Z_{12})}. \quad (40,17)$$

ე. ი. ის ორჯერ ნაკლებია, ვიდრე (40,16) განტოლებით გამოსახული უქმის სელის დენი.

ბ) ერთფაზა ასინქრონული ძრავის გაშვება. იმის გამო, რომ უძრავ მდგომარეობაში ($r=1$) ერთფაზა ასინქრონულ ძრავს აქვს მხოლოდ პულსური არე და მისი ბრუნვის მომენტი უდრის ნულს, გაშვებისათვის და საწყისი გამშვით მომენტის შესაქმნელად მიმართავენ სპეციალურ გამშვით მოწყობილობებს.

ამ მიზნით სტატორზე, გარდა მუშა (მთავარი) გრაგნილისა, მოათავსებენ აგრეთვე გამშვით (დამხმარე) გრაგნილს, რომელიც მთავარი გრაგნილისაგან



ნახ. 510. ერთფაზა ასინქრონული ძრავების გაშვების სქემა დამხმარე განშვით გრაგნილით.

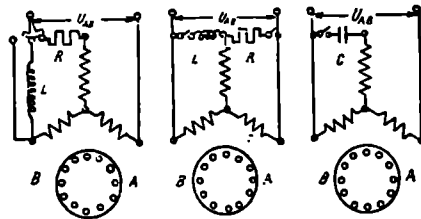
სივრცეში დაძრულია გარკვეული კუთხით, ჩვეულებრივად 90 ელექტრული გრადუსით.

თუ რაიმე საშუალებით: აქტიური (R), ინდუქტიური (L), ანდა ტევადური (C) წინააღმდეგობის ჩართვით მთავარ და დამხმარე გრაგნილებში დენებს დაეძრავთ ფაზით, მაშინ ძრავში შეიქმნება მბრუნავი მაგნიტური არე. ამგვარად, გაშვების დროს ჩვენ გვექნება არა ერთფაზა, არამედ ორფაზა და საერთო შემთხვევაში არასიმეტრიული ძრავი. მბრუნავი არე ამ შემთხვევაში ელიფტიური და არა წრიული.

გაშვების შემდეგ დამხმარე გრაგნილი შესაძლებელია გამოირთას და ძრავი შემდგომში იმუშაებს, როგორც ერთფაზა—ერთი მთავარი გრაგნილით.

მთავარ და დამხმარე გრაგნილებში დენებს შორის ძერის შესაქმნელად გამოყენებულია სხვადასხვა სქემები. ამ სქემების ნაწილი ნაჩვენებია ნახ. 510 და 511-ზე.

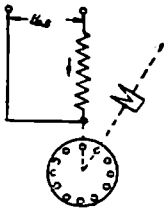
ნახ. 510-ის სქემები ეყუთვნის ერთფაზა ძრავებს დამხმარე გამშვით გრაგნილით.



ნახ. 511. სამფაზა ასინქრონული ძრავების გაშვების სქემა მათი ერთფაზა კვების შემთხვევაში.

ნახ. 511-ის სქემები კი სამფაზა ძრავებს მათი ერთფაზა კვების დროს. ამ უკანასკნელ შემთხვევაში გაშვების დროს მბრუნავი არეს შექმნის მიზნით გამოყენებულია სამივე ფაზის გრაგნილები, რომლებშიც აქტიური წინააღმდეგობის (R), ინდუქტიური (L), ან ტევადური (C) წინააღმდეგობის დახმარებით იქმნება დენების ასიმეტრიული სამფაზა-სისტემა. გაშვების შემდეგ ერთ-ერთი ფაზა დამხმარე წინააღმდეგობებთან ერთად (R, L, C) გამოირთვება და ძრავი ვადაყავთ ერთფაზა კვებაზე (A და B ფაზები).

მცირე სიმძლავრის ერთფაზა ძრავებში (მიკროძრავებში) (ნახ. 512) დამხმარე გრაგნილი ხშირად ქსელთან კი არაა მიერთებული, არამედ უბრალოდ ჩაკეტილია მოკლედ. ამ გრაგნილში დენი იქმნება მის მთავარ გრაგნილთან ტრანსფორმატორული კავშირის გამო.

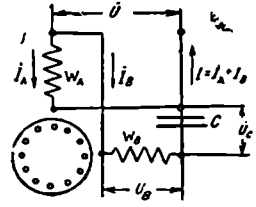


ერთფაზა ასინქრონული ძრავები გამშვი მახასიათებლების მიხედვით ჩამოუვარდება სამფაზა ძრავებს, ვინაიდან გამშვი სქემების გამოყენების დროს ყოველთვის ადგილი აქვს უკუსინქრონულ არეს მოქმედებას, რომელიც ამცირებს საწყის გამშვი მომენტს. სპეციალური როტორების (ღრმა ღრმული, ორმაგი ციყვის ბორბალი და სხვ.), გამოყენება ერთფაზა ძრავებისათვის არაა მიზანშეწონილი, რადგანაც ასეთ დროს უკუსინქრონული არე შექმნიდა როტორში დიდ დანაკარგებს და დიდ დამამუხრუქებელ მომენტებს.

ნახ. 512. ერთფაზა ასინქრონული ძრავის სქემა მოკლედ ჩაკეტილი დამხმარე გრაგნილით.

გ) ერთფაზა კონდენსატორული ძრავები. ბოლო დროს 50 Hz-ზე იაფი და საიმედო კონდენსატორების წარმოების ათვისებასთან დაკავშირებით დიდ გავრცელებას პოულობს ე. წ. „კონდენსატორული“ ერთფაზა ძრავები. ამ ძრავების სტატორში მოთავსებულია ორი ერთიმეორისაგან სივრცეში 90 ელექტრული გრადუსით დამართული გრაგნილები. ერთ-ერთ გრაგნილთან მიმდევრობით ჩართულია კონდენსატორი (ნახ. 513)¹, რომელიც ამ გრაგნილის დენს მეორე გრაგნილის დენის მიმართ ძრავს ფაზით 90°.

წინა შემთხვევაში (ნახ. 510), როდესაც ერთფაზა ძრავის გაშვება ხდება დამხმარე გრაგნილში კონდენსატორის გამოყენებით, განუვების პროცესის დამთავრებისთანავე ადგილი აქვს დამხმარე გრაგნილის გამოართვას. კონდენსატორულ ძრავებში აღნიშნულისაგან განსხვავებით სტატორის ორივე გრაგნილი ჩართულია არა მარტო გაშვების დროს, არამედ მუშაობის პროცესშიც. სტატორის წრედში მუდმივად ჩართული კონდენსატორი აუზღობესებს ძრავის მუშა და გამშვი მახასიათებლებს და უახლოვებს მათ ნორმალური სამფაზა ძრავის მახასიათებლებს. განვიხილოთ კონდენსატორულ ძრავებში ძირითადი შეფარდებები, რომლებიც განსაზღვრავენ მათი მუშაობის ხასიათს.



ნახ. 513.

¹ ხოჯჯო კონდენსატორის ძაბვის აწევის მიზნით B ფაზას კვებავენ ტრანსფორმატორის, ან ავტოტრანსფორმატორის საშუალებით. ეს ამცირებს კონდენსატორის ღირებულებას და მის გაბარიტულ ზომებს, თუმცა ამით მცირდება ძრავის მ. კ. ე.

უწინარეს ყოვლისა განვსაზღვროთ ტრევადობის ის მნიშვნელობა C , რომლის დროსაც კონდენსატორულ ძრავში მბრუნავი მაგნიტური არე წრიულია. ამისათვის აუცილებელია, რომ

$$jI_A k_{A\omega} = I_B k_{B\omega}; \quad (40,18)$$

$$jU_A = U_B \frac{k_{A\omega} \omega}{k_{B\omega} \omega}, \quad (40,19)$$

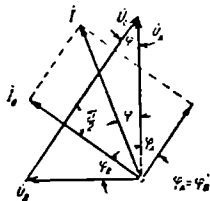
სადაც $K_{A\omega}$ და $W_{B\omega}$ გრაგნილის კოეფიციენტებია. გარდა ამისა საჭიროა, რომ B გრაგნილის A გრაგნილისადმი მიყვანილი აქტიური და რეაქტიული წინააღმდეგობები შესაბამისად ტოლი იყოს უკანასკნელის წინააღმდეგობების.

ძაბვებისა და დენების ვექტორული დიაგრამა, რომელიც შეესაბამება ნახ. 513-ის სქემას და (40,18), (40,19) პირობებს, მოყვანილია ნახ. 514-ზე.

ვექტორული დიაგრამიდან გვაქვს

$$I = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} = I_A \sqrt{1 + k_{AB}^2}; \quad (40,20)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_A = \frac{U_B}{U_A} = K_{BA}. \quad (40,21)$$



ნახ. 514.

(40,18) და (40,19) ტოლობებიდან

გვაქვს $I_A U_A = I_B U_B$, ამიტომ $k_{AB} \cdot k_{BA} = 1$.

ძრავის მიერ ქსელიდან მიღებული სიმძლავრე ტოლია:

$$P_1 = U_A I \cos \varphi = 2 U_A I_A \cos \varphi_A. \quad (40,22)$$

ამ განტოლებიდან, თუ მხედველობაში მივიღებთ (40,20), გვექნება

$$\cos \varphi \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi_A} = 2 \cos \varphi_A,$$

საიდანაც

$$\cos \varphi = 2 \cos \varphi_A \sin \varphi_A = \sin 2\varphi_A. \quad (40,23)$$

ეს შეფარდება გვიჩვენებს, რომ წრიული მბრუნავი არეს შემთხვევაში კონდენსატორულ ძრავს შეუძლია იმუშაოს მაღალი სიმძლავრის კოეფიციენტით. ასე მაგალითად, როდესაც $\cos \varphi_A = 0,8$; $\sin \varphi_A = 0,6$, $\cos \varphi = 2 \cdot 0,8 \cdot 0,6 = 0,96$, ამასთანავე I დენი U_A ძაბვის მიმართ წინგასწრებულია φ კუთხით. როდესაც $\varphi_A < 45^\circ$, ძაბვა $U_B < U_A$, დენი $I_A < I_B$ და კუთხე φ წარმოადგენს წინგასწრებულს. როდესაც $\varphi_A = 45^\circ$ კუთხე $\varphi = 0$, $U_A = U_B$ და $I_A = I_B$, თუ $\varphi_A > 45^\circ$, $U_A < U_B$, $I_A > I_B$, ამასთან φ წარმოადგენს ჩამორჩენილს.

C ტრევადობის მნიშვნელობა, რომელიც უზრუნველყოფს წრიულ მბრუნავ არეს, განისაზღვრება ნახ. 514-ზე ვექტორული დიაგრამიდან:

$$C = \frac{I_B}{\omega \sqrt{U_A^2 + U_B^2}} = \frac{I_B \sin \varphi_B}{\omega U_B}. \quad (40,24)$$

C ტრევადობით კონდენსატორის რეაქტიული სიმძლავრე ტოლია

$$P_C = I_B U_C = I_B \frac{U_B}{\sin \varphi_B}$$

ვინაიდან $\varphi_A = \varphi_B$ და (40,23)-ის თანახმად

$$\sin \varphi_B = \frac{\cos \varphi}{2 \cos \varphi_B}$$

ამიტომ

$$P_C = \frac{2I_B U_B \cos \varphi_B}{\cos \varphi} = \frac{P_1}{\cos \varphi} = U_A I, \quad (40,25)$$

ე. ი. კონდენსატორის რეაქტიული სიმძლავრე ძრავის მოჩვენებითი სიმძლავრის ტოლია.

კონდენსატორული ძრავის ნაკლს ის მოვლენა შეადგენს, რომ (40,24) განტოლების თანახმად არჩეული C ტევადობა უზრუნველყოფს წრიულ მბრუნავ მაგნიტურ არეს მხოლოდ ძრავის ერთი გარკვეული დატვირთვისათვის. სხვა დატვირთვების შემთხვევაში მბრუნავი მაგნიტური არე ელიფტიურია, ე. ი. ადგილი აქვს ინვერსიულ არეს, რომელიც ძრავის მუშა მახასიათებლებს აუარესებს.

ამ ნაკლის თავიდან ასაცილებლად ზოგიერთ შემთხვევაში C ტევადობას არეგულირებენ საფეხურებით, რათა ძრავის ცვალებადი დატვირთვის დროს C მნიშვნელობა მიუახლოვდეს ოპტიმალურს.

ვინაიდან ცვალებადი დატვირთვის შემთხვევაში კონდენსატორული ძრავი მრავალფაზა ძრავის, მსგავსია როდესაც ის მუშაობს ქსელის არასიმეტრიული ძაბვით, ამიტომ კონდენსატორული ძრავის გამოკვლევისათვის შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს ნაწ. IV, § 38-ში განხილული მეთოდი.

რადგანაც საერთო შემთხვევაში $W_B \neq W_A$, ამიტომ შემდგომ ანგარიშში განვიხილავთ B ფაზის წრედის ყველა სახასიათო სიდიდეების მიყვანილ მნიშვნელობებს:

$$\dot{I}'_B = \dot{I}_B k_{BA}, \quad \dot{U}'_B = \dot{U}_B k_{AB}, \quad \dot{U}'_C = \dot{U}_C k_{AB}, \quad X'_C = X_C k^2_{AB},$$

სადაც

$$X_C = -j \frac{1}{\omega C}$$

სიმეტრიული მდგენელების მეთოდის გამოყენებით შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\dot{I}'_B = j \dot{I}'_{A1}; \quad (40,26)$$

$$\dot{I}'_{B2} = -j \dot{I}'_{A2}, \quad (40,27)$$

სადაც 1 და 2 ინდექსები ეკუთვნის შესაბამისად პირდაპირი და უკუმიმდევრობის სისტემებს.

ვინაიდან $\dot{I}'_A = \dot{I}'_{A1} + \dot{I}'_{A2}$ და $\dot{I}'_B = \dot{I}'_{B1} + \dot{I}'_{B2} = j(\dot{I}'_{A1} - \dot{I}'_{A2})$, ამიტომ

$$\dot{I}_{A1} = \frac{1}{2} (\dot{I}_A - j\dot{I}'_B); \quad (40,28)$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{1}{2} (\dot{I}_A + j\dot{I}'_B) \quad (40,29)$$

აღენიშნავთ რა მოცემული სრილის დროს ძრავის წრედის პირდაპირი და უკუმიმდევრობის სრულ წინააღმდეგობებს Z_{s1} და Z_{s2} -თი, მივიღებთ:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_{A1}Z_{s1} + \dot{I}_{A2}Z_{s2}; \quad (40,30)$$

$$\dot{U}'_B + \dot{U}'_C = \dot{U}_A k_{AB} = \dot{I}'_{B1}(Z_{s1} + X'_C) + \dot{I}'_{B2}(Z_{s2} + X'_C). \quad (40,31)$$

(40,26) (40,27), (40,30) და (40,31) განტოლებების ერთდროული ამოხსნით მოგვახვავთ:

$$\dot{I}'_{A1} = \dot{U}_A \frac{X'_C + Z_{s2}(1 - jk_{AB})}{Z_{s1}(Z_{s2} + X'_C) + Z_{s2}(Z_{s1} + X'_C)}; \quad (40,32)$$

$$\dot{I}'_{A2} = \dot{U}_A \frac{X'_C + Z_{s1}(1 + jk_{AB})}{Z_{s1}(Z_{s2} + X'_C) + Z_{s2}(Z_{s1} + X'_C)}. \quad (40,33)$$

ისეთი დატვირთვის დროს, როდესაც უკუმიმდევრობის \dot{I}'_{A2} დენი ნულის ტოლია, კონდენსატორული ძრავის მუშაობის რეჟიმი იქნება სრულიად სიმეტრიული. ეს (40,33)-ის თანახმად შეესაბამება პირობას:

$$X'_C + Z_{s1}(1 + jk_{AB}) = 0,$$

საიდანაც ვღებულობთ:

$$r_{s1} = \frac{x'_C k_{AB}}{1 + k^2_{AB}}; \quad (40,34)$$

$$x_{s1} = \frac{x'_C}{1 + k^2_{AB}}. \quad (40,35)$$

წინააღმდეგობები Z_{s1} და Z_{s2} შესაძლებელია ადვილად განვსაზღვროთ შენაცვლების სქემიდან, რომელიც კონდენსატორული ძრავისათვის არაფრით არ განსხვავდება სამფაზა ასინქრონული ძრავის შენაცვლების სქემიდან. Z_{s2} წინააღმდეგობისათვის სრული 2-ს-ის ტოლია და მხედველობაში მიიღება როტორის წრედში სიხშირის ზრდა. ძრავის ბრუნვის მომენტი განისაზღვრება როგორც პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის მომენტების სხვაობა (39,6), (39,2) და (39,4) ფორმულების თანახმად. ამ ფორმულებით სარგებლობისათვის წინასწარ პოულობენ U_{11} პირდაპირი და U_{12} უკუმიმდევრობის ძაბვებს შემდეგი შეფარდებებიდან:

$$\dot{I}'_B = jk_{AB}(\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{A2}); \quad (40,36)$$

$$\dot{U}'_B = k_{AB}(\dot{U}_A - \dot{I}_B X'_C); \quad (40,37)$$

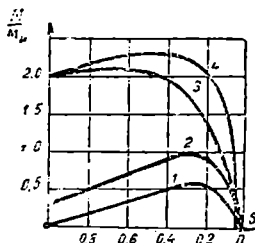
$$\dot{U}_A = \dot{U}_{11} + \dot{U}_{12}; \quad (40,38)$$

$$\dot{U}_B = j\dot{U}_{11} - j\dot{U}_{12}; \quad (40,34)$$

$$\dot{U}_{11} = \frac{1}{2} (\dot{U}_A - j\dot{U}'_B); \quad (40,40)$$

$$\dot{U}_{12} = \frac{1}{2} (\dot{U}_A + j\dot{U}'_B). \quad (40,41)$$

ნახ. 515-ზე მოყვანილია ბრუნვის მომენტის მრუდები, რომლებიც ახასიათებს კონდენსატორული ძრავების მუშაობას. 1 მრუდი შეესაბამება შემთხვევას, როდესაც ძრავის ორივე გრაგნილი იკვებება ერთფაზა ქსელიდან კონდენსატორის გარეშე. მრუდი 2—შემთხვევას, როდესაც სქემაში ჩართულია მცირე ტევადობის კონდენსატორი. 3 მრუდი აგებულია ძრავის ორფაზა სისტემიდან კვებისათვის. 4—მრუდი შეესაბამება ისეთი C ტევადობის ჩართვას,



ნახ. 515. ბრუნვის მომენტების შედარებითი მრუდები კონდენსატორული ძრავის სხვადასხვა სქემებით ჩართვის დროს.

რომლის დროსაც საწყისი ბრუნვის მომენტი ტოლია ძრავის გამწვი მომენტისა მისი ორფაზა კვების შემთხვევაში.

მოკუმული მრუდები გვიჩვენებს, რომ ტევადობის შერჩევით შესაძლებელია ფართო ფარგლებში ვარგეულიროთ. გამწვი მომენტი და გავზარდოთ ძრავის ბრუნვის მომენტის მაქსიმუმი: თუმცა ნომინალური ბრუნვის სიჩქარის ახლოს საჭიროა შევამციროთ C ტევადობა, ვინაიდან წინააღმდეგ შემთხვევაში ძრავი მუშაობს დიდი სრიალით და ამცირებს თავის მ. ქ. კ. ამ მიზნით C ტევადობას ჩვეულებრივად ასრულებენ საფეხურებიანი რეგულირებით.

ზოგჯერ შესაძლებელია სამფაზა ძრავების, როგორც კონდენსატორული ძრავების გამოყენება, რომლებიც ამ შემთხვევაში ირთება ნახ. 516-ზე წარმოდგენილი ერთ-ერთი სქემის მიხედვით.

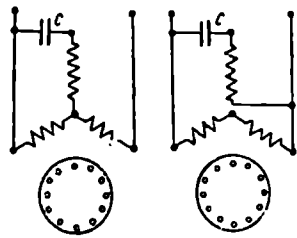
დ) ერთფაზა ძრავი შუალედი როტორით. ერთფაზა ძრავის მუშა მახასიათებლების გაუმჯობესებისათვის მისი ელექტრომაგლეტზე წვევის ძრავად გამოყენების მიზნით ფ. პუნგამ¹ წამოაყენა შუალედ როტორიანი ერთფაზა ძრავის ორიგინალური კონსტრუქცია (ნახ. 517).

ამ ძრავის მუშა როტორსა და სტატორს შორის მოთავსებულია დანებმარე ცილინდრული ფორმის როტორი ორი გრაგნილით: მოკლედ შერთული და მუდმივი დენის დამატებითი გრაგნილით.

შუალედი როტორი ლილვთან არაა მექანიკურად დაკავშირებული. გავყვების პროცესში პირველად უშვებენ შუალედ როტორს. მისი გაქანებისათვის საკმარისია სტატორზე მოთავსებული მცირე სიმძლავრის დამხმარე გრაგნი-

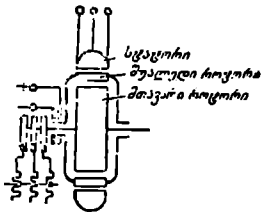
¹ ასეთი ძრავის იდეა ფ. პუნგაზე ადრე გამოთქმული იყო ვ. ს. კულებაკინის მიერ.

ლით შექმნილი მცირე მომენტი. როდესაც შუალედი როტორი განავითარებს დაახლოებით სინქრონულ სიჩქარეს, ძრავში პრაქტიკულად დარჩება მხოლოდ პირდაპირი სინქრონული მაგნიტური არე, ვინაიდან უკუსინქრონული არე თითქმის მთლიანად კომპენსირდება შუალედი როტორის მოკლედ შერთული გრაგნილით. ასეთ პირობებში მთავარი როტორის გაშვება იოლია და ხორციელდება დიდი გამწვი მომენტის ქვეშ გამწვი რეოსტატის საშუალებით, როგორც ჩვეულებრივ სამფაზა ძრავში. გაშვების დამთავრების შემდეგ შუალედი როტორის გრაგნილში გაატარებენ მუდმივ დენს. როტორი აღვილად შედის სინქრონიზმში და ბრუნავს ისე, როგორც სინქრონული ძრავის როტორი სინქრონულად მაგნიტურ არესთან. თუ მუდმივი დენის სიდიდეს ვარეგულირებთ, შესაძლებელია ქსელი განვტვირთოთ რეაქტიული დენისაგან, რომლითაც იკვებება სტატორი და, ამგვარად, მთელი აღგზნება გადაეიტანოს დამხმარე როტორზე. ამასთან, ძრავის სიმძლავრის კოეფიციენტი შესაძლებელია გავხადოთ ერთის ტოლი, ანდა ვაიძლოთ ძრავი იმუშაოს წინგასწრებული დენით. ასეთი სახის ძრავებს ამზადებს გერმანული ფირმა „კრუპა“. ამ ძრავებმა დიდი გავრცელება ვერ ჰპოვეს კონსტრუქციული სირთულის გამო.

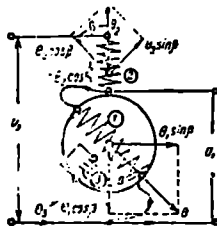


ნახ. 516. სამფაზა ასინქრონული ძრავების ჩართვის სქემა მათი ერთფაზა კონდენსატორულ ძრავებად გამოყენების შემთხვევაში.

ვ) ერთფაზა ინდუქციური რეგულატორი. ერთფაზა ასინქრონულ ძრავს დამუხრუქებულ მდგომარეობაში შეუძლია იმუშაოს, როგორც ინდუქტორმა



ნახ. 517. ფ. უუნგას ძრავის სქემა შუალედი როტორით.



ნახ. 518.

(პოტენციალურმა) რეგულატორმა. ასეთი რეგულატორის ჩართვის სქემა ნაჩვენებია ნახ. 518-ზე.

როტორის მობრუნების შემთხვევაში მისი გრაგნილის დამამაგნიტებელ ძალას სტატორის გრაგნილის ღერძის მიმართ აქვს გრძივი $\theta_1 \cos \alpha$ და განივი $\theta_1 \sin \alpha$ მდგენელები. თუ სტატორის გრაგნილში დენი არ გვქვს (უქმი სელა), მაშინ მის გრაგნილთან ნაკად შებმას გვაძლევს მხოლოდ როტორის

დამამაგნიტებელი ძალის გრძივი მდგენელი $\Theta_1 \cos \beta$. ამიტომ, როდესაც $\Theta_1 = \text{const}$, სტატორას ე. მ. ძ. E_2 იცვლება $\cos \beta$ -ს პროპორციულად. როდესაც $\beta = 0$, ე. მ. ძ. E_2 მაქსიმალურია; როდესაც $\beta = \frac{\pi}{2}$, ე. მ. ძ. ნულის ტოლია.

თუ $\beta > \frac{\pi}{2}$, მაშინ ე. მ. ძ. E_2 იცვლის თავის ფაზას. ამიტომ უქმი სვლის დროს $U_2 \approx U_1 \pm E_2 \cos \beta$, რადგანაც E_2 ე. მ. ძ. და U_1 ძაბვა პრაქტიკულად ფაზით ემთხვევა ერთმანეთს.

დატვირთვის დროს სტატორის ღენის ზრდასთან ერთად იზრდება როტორის ღენი, ამასთან Θ_1 და $\Theta_2 \cos \beta$ ერთიმეორეს აკომპენსირებს იმდენად, რამდენადაც ეს საჭიროა როტორის გრძივი ღერძის გასწვრივ არეს შესანარჩუნებლად. სტატორის $\Theta_2 \sin \beta$ დამამაგნიტებელი ძალები განივი ღერძის გასწვრივ თითქმის მთლიანად კომპენსირდება როტორის 1 მთავარი გრაგნილის მიმართ სივრცეში 90° -ით დაძრული სპეციალური მოკლედ შერთული გრაგნილის Θ_2 დამამაგნიტებელი ძალებით. იმ შემთხვევაში, რომ არ გვექონოდა 3 გრაგნილი, $\Theta_2 \sin \beta$ დამამაგნიტებელი ძალა დარჩებოდა არაკომპენსირებულად, რაც როტორის მოძრუნების დროს ძლიერ გაზრდიდა რეგულატორის ინდუქციურ წინააღმდეგობას. დატვირთვის დროს რეგულირების ზღვრები რამდენადმე განსხვავდება იმ ზღვრებისაგან, რომლებიც გვაქვს უქმი სვლის დროს; ასეთი სხვაობა გამოწვეულია რეგულატორში ძაბვის ვარდნით.

ერთფაზა ინდუქციური რეგულატორები გავრცელებულია უმთავრესად ამერიკის შეერთებულ შტატებში, სადაც ისინი გამოყენებულია ძაბვის რეგულირების მიზნით, როგორც ერთფაზა, ისე სამფაზა ქსელებში. უკანასკნელ შემთხვევაში ერთფაზა რეგულატორები სამფაზა ჯგუფური შეერთებისაა.

ერთფაზა ინდუქციური რეგულატორების უპირატესობას წარმოადგენს: 1) ფაზით U_1 და U_2 ძაბვების უმნიშვნელო ძვრა, 2) სამფაზა ჯგუფური შეერთების ყოველ ფაზაში დამოუკიდებელი რეგულირების შესაძლებლობა.

უნდა აღინიშნოს, რომ სამი ერთფაზა რეგულატორის ღირებულება რამოდენიმედ ღეტი, ვიდრე ერთი სამფაზა რეგულატორის ღირებულება.

41. სმგმენტური ასინძრონული ძრავი

ასინქრონული მანქანის შემდგომი განვითარების ერთ-ერთ მიმართულებას წარმოადგენს ასინქრონული ძრავის კონსტრუქციული შეთავსება („შეხორცება“) მის მიერ მოძრაობაში მოყვანილ მექანიზმთან.

ასინქრონული ძრავის მუშა მექანიზმთან შეთავსების საინტერესო მაგალითს წარმოადგენს ე. წ. „სეგმენტური“ ძრავი „რკალისებური“ სტატორით, რომელშიც შუალედი რკალების რიცხვი დაყვანილია მინიმუმამდე. ასეთი სახის ასინქრონული ძრავი წამოყენებული იყო ინჟ. პ. ა. ფრადცინის მიერ¹.

¹ იხ. ჟურნალი „Электричество“ 7 და 8, 1937 წ.

თუ ასინქრონული ძრავის სტატორს შევასრულებთ გახსნილს, რომელიც როტორს მოიცავს მხოლოდ $\alpha = \pi$ რკალის ფარგლებში (ნახ. 519), მაშინ მაგნიტური არეს ტალღა სტატორის თავიდან ბოლომდე გაქანების დროს როტორს მოაბრუნებს არა $2\pi(1-s)$ კუთხით, როგორც ეს ხდება ჩვეულებრივ მანქანაში, არამედ $\alpha(1-s)$ კუთხით.

ამგვარად, ასეთი სეგმენტური ძრავის ბრუნვის სიჩქარე ტოლი იქნება:

$$n = \frac{60f}{P} \cdot \frac{\alpha}{2\pi} (1-s). \quad (41,1)$$

ეს გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ სეგმენტური მანქანის ბრუნვის ასინქრონული სიჩქარის ($s=0$) შერჩევა, როდესაც $f = \text{const}$, შესაძლებელია არა მარტო P წყვილ პოლუსთა რიცხვის ცვლით, ე. ი. საფეხურებით, არამედ მდოვრედაც კუთხე α -ს სათანადო შერჩევით.

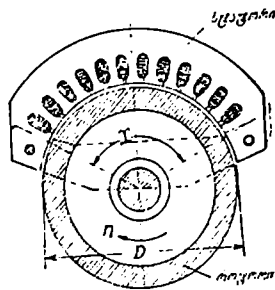
ნებისმიერი ასინქრონული სიჩქარეების (0-დან $60f$ -მდე) მიღების შესაძლებლობა მეტად აფართოებს ასინქრონული მანქანის გამოყენების სფეროს და საშუალებას გვაძლევს ზოგიერთ შემთხვევაში სრულიად გამოვრიცხოთ რთული და ძვირი მექანიკური რელექტორები. თუმცა „რელექტორიანმა“ ძრავებმა, სადაც რელექტორი კონსტრუქციულად გაერთიანებულია ძრავთან საერთო გარკმში, ბოლო დროს საგრძნობი გავრცელება ჰპოვა მცირე სიჩქარეების შემთხვევაში; მაგრამ სეგმენტური ძრავები, ალბათ, სულ უმოკლეს ხანში შეძლებენ გამოვრცხონ ისინი ელექტრული მოწყვანის ბევრ შემთხვევაში.

სეგმენტურ ძრავებში მუშა მექანიზმის მბრუნავი ნაწილების როტორად გამოყენების გზით მეტად ადვილადაა განხორციელებული ძრავისა და მუშა იარაღის გაერთიანების საკითხი; ასეთ დროს მბრუნავ ნაწილებზე მოთავსებულია გრავილი ციყვის ბორბლის სახით შესრულებული.

ნახ. 520-ზე სქემატურად ნაჩვენებია სეგმენტური ძრავის შეთავსება ბირთვისებურ ნახშირის მჭექველ წისქვილთან.

რკალისებური სტატორი შესაძლებელია მოთავსებულ იქნას აგრეთვე როტორის შიგნით (ნახ. 521), როგორც ამას ადგილი აქვს ელექტროკარდულ მანქანებში¹.

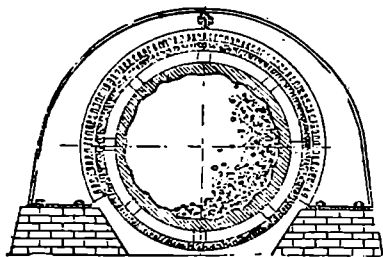
სეგმენტისებური მანქანის სახესხვაობას წარმოადგენს ასინქრონული ძრავი გადატანით-უქუქვეითი მოძრაობით. ასეთი ძრავის გახსნილი სტატორი გასწორებულია და ამიტომ როტორს აქვს სწორხაზობრივი მოძ-



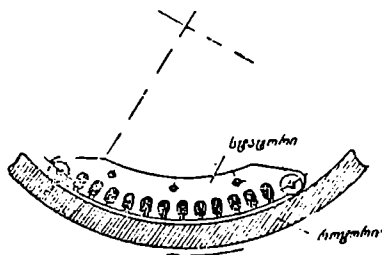
ნახ. 519. სეგმენტური ასინქრონული ძრავის სტატორი რკალური სტატორით.

¹ კარდული მანქანა იხმარება ბოქვების ვაჭევისათვის მათი მოქსოვის წინ.

რაობა. დროის განსაზღვრულ მომენტებში გრაგნილის ვადართვით ხდებო
არეს მიმართულების შეცვლა და ამგვარად ხორციელდება როტორის სწორ-
ხაზოვანი უკუქცევითი-გადატანითი მოძრაობა.



ნახ. 520. სეგმენტური სინქრონული ძრავის სქემა ბირთვისებურ ნახშირმჟებელი წისქვილისათვის.



ნახ. 521. სეგმენტური სინქრონული ძრავის სქემა ბირთვისებურ ნახშირმჟებელი წისქვილისათვის.

42. ასინქრონული მანქანების დანაკარგები, გახუტება და გაცივება

ა. ასინქრონული მანქანების სიმძლავრის დანაკარგები და მ. კ. ელექტრული მანქანების სიმძლავრის დანაკარგები და მათი გამოადგი-
თვლის მეთოდები განხილული იყო III, ნაწ. § 25-ში. ასინქრონულ მანქანებში
ლი აქვს დანაკარგების შემდეგ სახეებს: 1) დანაკარგები სტატორის
გრაგნილის სპილენძში; 2) დანაკარგები როტორის გრაგნილის სპილენძში;
3) სტატორისა და როტორის გრაგნილებში, ან სხვა ნაწილში გრიგლური
დენებით გაპირობებული დანაკარგები, რომლებიც პროპორციულია სტატო-
რის დენის კვადრატის, 4) დანაკარგები სტატორისა და როტორის ფოლად-
ში (ულღებში და კბილებში); 5) ზედაპირული დანაკარგები სტატორისა და
როტორში, 6) სტატორისა და როტორის კბილებში პულსაციური დანაკარ-
გები 7) მექანიკური დანაკარგები (ჰაერთან ხახუნზე, საკისარებში და სხვ).

სტატორისა და როტორის სპილენძში დანაკარგები ჩვეულებრივად შე-
ფარდებულია ეკვივალენტურ მუდმივ დენს (რომელიც ცვლადი დენის ეფექ-
ტურ მნიშვნელობას უდრის) და ტემპერატურას 75°C .

დენის სიმკვრივის არათანაბარი განაწილებით გამოწვეული დანაკარგები
გრაგნილში, ფანტის არეებისა და ძნელად აღსარიცხი მაგნიტური არეს პულსა-
ციით გაპირობებული გრიგლურ დენებზე დანაკარგები მანქანის სხვადასხვა
ნაწილებში ასინქრონული მანქანებისათვის გაერთიანებულია დამატებითი
დანაკარგების საერთო კატეგორიაში; ეს დანაკარგები (მსტჩი 20020-ის თა-
ნახზად ნომინალური დატვირთვის შემთხვევაში ტოლია მანქანა ზემოყვანილი
აქტიური სიმძლავრის $0,5\%$ ¹, ხოლო სხვა დატვირთვის დროს გადა-
იზღვება სტატორის J_1 დენის კვადრატის პროპორციულად:

¹ ცდები გვიჩვენებს, რომ დამატებითი დანაკარგები ზოგიერთ შემთხვევაში აღემა-
ტება $0,5\%$.

$$P_{\text{კაბ}} = 0,5 \left(\frac{I_1}{I_{1n}} \right)^2 \% \quad (42,1)$$

პისტერეზისისა და გრიგლურ დენებისაგან დანაკარგებს ფოლადში უმთავრესად ადგილი აქვს სტატორის უღლებსა და კბილებში. როტორის ფოლადში დანაკარგები სინქრონულთან ახლო სიჩქარეების დროს ძალზე მკირვა და მათი აღრიცხვა შესაძლებელია ნხოლოდ ისეთი რეეიმების დროს, როდესაც როტორის დენის სიხშირე შედარებით დიდია.

ცხრილი 26

დანაკარგების განაწილება 500 K W-იან ასინქრონულ ძრავში

დანაკარგების სახე	დანაკარგების სიდიდე W-ში	დანაკარგების სიდიდე %-ში
1. სტატორის გოგონილში დანაკარგები	6400	25
2. როტორის " " "	5750	22,5
3. დამატებითი დანაკარგები (0,5%)	2880	11,3
4. დანაკარგები სტატორის უღლებში	2640	10,3
5. დანაკარგები სტატორის კბილებში	1330	5,2
6. ზედაპირული დანაკარგები სტატორში	220	0,87
7. პულსაციური დანაკარგები სტატორში	110	0,43
8. ზედაპირული დანაკარგები როტორში	1500	5,9
9. პულსაციური დანაკარგები როტორში	1230	4,8
10. დანაკარგები ჰაერთან და საკისრებში ხაზუნებში	3500	13,7
საერთო დანაკარგები ძრავში	25560	100

მაგალითის სახით განვიხილოთ დანაკარგების განაწილება ასინქრონულ ძრავში ფაზური როტორით, რომლის სიმძლავრეა 500 K W, ძაბვა 3000 V, 1000 ბრ/წუთში, 50 Hz. ნორმალური დატვირთვის შემთხვევაში ამ ძრავის ცალკეული დანაკარგების მნიშვნელობები მოყვანილია 26-ე ცხრილში.

სტატორის ღრმელები ღია ფორმისაა, ხოლო როტორის ნახევრად დახურული.

ცხრილის მონაცემებიდან ჩანს, რომ მანქანის მთელი დანაკარგების, ხაზუნებ და ჰაერთან დანაკარგების ჩათვლელად, მთავარი ნაწილი შეეურსულა სტატორის საკბილო ფენაში ($-37,2\%$) და როტორის საკბილო ფენაში (38, 7%).

საბჭოთა კავშირში დამზადებული ასინქრონული ძრავების ზოგიერთი ტიპების მ. ქ. კ. მნიშვნელობა მოცემულია 27-ე ცხრილში.

თუ 27-ე ცხრილის ციფრებს ანალიზს გავუკეთებთ, ძრავის მ. ქ. კ.-ის თვალსაზრისით შესაძლებელია გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

1. ძრავის სიმძლავრის ზრდით მ. ქ. კ. იზრდება.

2. სტატორის ძაბვის ზრდით უარესდება სტატორის საკბილო ფენის გამოყენება და მ. ქ. კ. მცირდება.

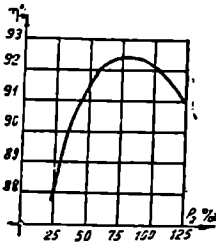
3. ბრუნვის სიჩქარის შემცირებით მ. ქ. კ. უმთავრეს შემთხვევაში მცირდება.

4. საშუალო და დიდი სიმძლავრის ფაზურ როტორიან და ღრმა ღრმულ-ლიან ასინქრონულ ძრავებს აქვთ დაახლოებით ტოლი მ. ქ. კ.; მცირე სიმძლავრის ძრავებს ფაზური როტორით აქვთ შედარებით დაბალი მ. ქ. კ.

მეტად დამახასიათებელია ასინქრონულ მანქანაში მ. ქ. კ.-ის დამოკიდებულება დატვირთვისაგან. ვინაიდან დენის კვადრატზე დამოკიდებული დანაკარგები ასინქრონულ მანქანაში ჩვეულებრივად მეტია, ვიდრე მუდმივი დანაკარგები, ამიტომ მ. ქ. კ. მაქსიმუმი გვაქვს ნორმალურზე ნაკლები დატვირთვის დროს, როგორც ეს გამომდინარეობს III, ნაწ. § 25-დან.

ნახ. 522-ზე ნაჩვენებია მ. ქ. კ. დამოკიდებულება დატვირთვისაგან ასინქრონული ძრავისათვის 125 K W 1000 ბრ/წთ.

27-ე ცხრილში მოყვანილ მ. ქ. კ. მნიშვნელობები განისაზღვრება კონიუნქტურული პირობებით და სპილენძისა და ფოლადის დეფიციტურობის ხარისხით. თუ დენის სიმკვრივესა და ინდუქციას



ნახ. 522.

შეგამცირებთ და ამით გავზრდით სპილენძისა და რკინის წონებს, შესაძლებელია სხვა უცვლელი პირობებისათვის გავზარდოთ ძრავის მ. ქ. კ. და შეგამციროთ ენერჯიის დანაკარგები ელექტრულ სისტემებში. სპილენძის მოპოვებისა და ფოლადის გამოდნობის ზრდასთან ერთად ამ მასალების დეფიციტურობა მცირდება და ძრავების მ. ქ. კ., ალბათ, ექნება თანდათანობითი ზრდის ტენდენცია.

ბ) ასინქრონული მანქანების გახურება. დატვირთვის შემთხვევაში ასინქრონული მანქანის გახურების შეფასების დროს ჩვეულებრივად ძირითად კრიტერიუმად მიღებულია სტატორის გრაგნილის გახურების ტემპერატურა.

ასინქრონული მანქანის, ისე როგორც საერთოდ ყველა მბრუნავი მანქანის ტემპერატურულ არეს აქვს მეტად რთული ხასიათი, რომელიც დამოკიდებულია დანაკარგების სივრცული განაწილებისაგან, მანქანის გახურებული ნაწილების ახლოს გამაცივებელი ჰაერის მიმართულებისაგან, მისი მოძრაობის სიჩქარისა და ხარჯისაგან.

თბური არეს ტიპური სახე მანქანის სტატორის ერთ-ერთ რადიალურ კვეთში ნაჩვენებია ნახ. 523-ზე. თბური არეს სირთულე გვაძლევს გახურების შეფასების დროს განვიხილოთ სტატორის გრაგნილის, სტატორის ფოლადისა და როტორის გრაგნილის ტემპერატურების მხოლოდ საშუალო მნიშვნელობები.

გრაგნილების საშუალო ტემპერატურად ჩვეულებრივად მიღებულია ის

ტემპერატურა, რომელიც დადგენილია გრაგნილის წინააღმდეგობის ცვლილებით მისი მუდმივი დენით გაზომვის შემთხვევაში.

ტოლობიდან

$$r_2 = r_1 [1 + \alpha(\vartheta_2 - \vartheta_1)]$$

პოულობენ

$$\vartheta_2 = \frac{r_2 - r_1}{r_1} (234,5 + \vartheta_1) + \vartheta_1, \quad (42,2)$$

სადაც r_1 გრაგნილის წინააღმდეგობაა ცივ მდგომარეობაში, როდესაც მისი ტემპერატურა ტოლია ϑ_1 ; r_2 —წინააღმდეგობა, გრაგნილის საძიებელი საშუალო ϑ_2 ტემპერატურის დროს განსაზღვრული წინააღმდეგობაა. α —წინააღმდეგობის ტემპერატურული კოეფიციენტი და სპილენძისათვის ტოლია $\alpha = \frac{1}{234,5 + \vartheta_1}$. გრაგნილის ყველაზე გახურებული ნაწილების ტემპერა-

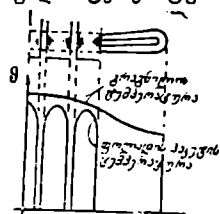
ტურის განსაზღვრა პრაქტიკულ პირობებში ჩვეულებრივად სიძნელეს წარმოადგენს, ვინაიდან ეს ნაწილები გაზომვისათვის ხშირად ძნელი მისაწვდომია და ყოველთვის არც ისე ადევილად საპოვნი. როგორც (ცა გვიჩვენებს, დამყარებული რეჟიმის დროს სტატორის გრაგნილის საშუალო ტემპერატურასა და მანქანაში მიყვანილი გამაცივებელი ჰაერის ტემპერატურას შორის სხვაობა შესაძლებელია წარმოდგენილი იქნეს შემდეგი სახით:

$$\Theta = \alpha + \beta I_1^2. \quad (42,3)$$

სადაც I_1 —სტატორის დენია, ხოლო სიდიდეები α და β დამოკიდებულია დანაკარგებისაგან და მანქანის კონსტრუქციისაგან და მათი საიმედო განსაზღვრა შესაძლებელია მხოლოდ ცდის საშუალებით. როდესაც $I_1 = 0$, $\Theta = \alpha$, ამგვარად, α -ს სიდიდე პროპორციულია სტატორის ფოლადში დანაკარგების და დამატებითი დანაკარგების ჯამის, რომლებიც ამ შემთხვევაში გრაგნილს ახურებს.

β -ს სიდიდე იმ დანაკარგების პროპორციულია, რომლებიც სტატორის გრაგნილს ახურებს და იცვლება დაახლოებით სტატორის დენის კვადრატის პროპორციულად. ამ დანაკარგებს უნდა მივაკუთვნოთ დანაკარგები: სტატორის სპილენძში, ნაწილობრივად როტორში და დამატებითი დანაკარგები.

ნორმალური შესრულების ძრავებში, სადაც სტატორის გრაგნილისათვის გამოყენებულია A კლასის იზოლატია, ნაწ. I, § 6, საშუალო ტემპერატურის ზღვრული მნიშვნელობა იღება 65°C . ამიტომ, თუ საშუალოდ მივიღებთ $\alpha \approx 10^\circ\text{C}$, მაშინ (42,3)-ის თანახმად ასინქრონული ძრავის გრაგნილისათვის დაახლოებით შეგვიძლია ჩავთვალოთ



ნაზ. 523. სტატორის გრაგნილისა და ფოლადის პაკეტების ტემპერატურების განაწილება ასინქრონული მანქანის ღერძის ვასწვრივ.

¹ ეს თეორიული შემთხვევა, ვინაიდან მაგნიტური არეს არსებობის დროს სტატორის დენი არ შეიძლება ნორმალურად ნულის ტოლი იყოს.

ახიქრონიული ძრავების მ. კ. და COS უ-ის მნიშვნელობები

ძრავის ტიპი (სერია)	სიძლიერე (სპ/მთ)	ბრუნვის სიჩქარე (რ/მთ)	მ. კ. და COS უ-ის მნიშვნელობები	სიძლიერე (სპ/მთ)	ბრუნვის სიჩქარე (რ/მთ)	სიძლიერე (სპ/მთ)	ბრუნვის სიჩქარე (რ/მთ)	სიძლიერე (სპ/მთ)	ბრუნვის სიჩქარე (რ/მთ)	$k_M = \frac{M_m}{M_n}$	$m_n = \frac{k_M}{k_I}$	$\frac{M_m}{M_n}$	η %	წინა კონსტრუქცია	კონსტრუქცია
АЛ	1,6	3 000	81,0	80,5	0,87	0,8	7,0	1,8	0,257	2,6	2,5	2,5	2,5	27	—
АЛ	10,0	3 000	86,5	86,5	0,89	0,86	7,5	2,5	0,333	2,5	2,2	2,2	2,2	86	—
АЛ	1,5	1 500	80,5	81,0	0,84	0,79	7,5	2,0	0,400	2,2	2,5	3	3	29	—
АЛ	10,0	1 500	87,0	87,0	0,87	0,83	7,5	2,2	0,293	2,5	2,2	2,2	2,2	28,5	—
МА-200	13	1 500	87,6	88,3	0,87	0,83	6,5	1,4	0,216	2,2	2,2	2,5	2,5	121	0,51
МА-200	37	1 500	89,9	90,3	0,89	0,86	6,5	1,4	0,216	2,2	2,2	2,0	2,0	240	1,87
МА-200	11,8	1 000	86,5	87,3	0,83	0,79	6,0	1,3	0,217	1,8	2,1	2,7	2,7	138	0,77
МА-200	40	1 000	89,6	90,3	0,85	0,83	6,0	1,1	0,183	1,8	2,1	2,1	2,1	375	4,25
МА-200	14	750	85,8	86,8	0,83	0,77	5,5	1,1	0,200	1,8	2,5	3,6	3,6	198	1,65
МА-200	36	750	89,8	91	0,855	0,825	5,5	1,1	0,200	1,6	2,5	2,5	2,5	405	5,4
МА-200	14,5	1 500	85,3	86,5	0,855	0,800	—	—	—	2,2	4,7	152	4,7	152	0,62
МА-200	12,7	1 000	85,5	86,3	0,800	0,740	—	—	—	2,2	4,9	202	4,9	202	0,83
МА-200	12,5	750	84,2	85,5	0,785	0,725	—	—	—	2,0	5,5	224	5,5	224	1,87
AM	125	1 500	91,5	92	0,9	0,89	—	—	—	2,0	2,7	1 000	2,7	1 000	14,5
AM	120	1 000	92,0	92,5	0,89	0,87	—	—	—	2,5	2,5	1 105	2,5	1 105	22,5
AM	125	500	91,0	91,5	0,81	0,77	—	—	—	1,8	4,0	1 510	4,0	1 510	62
РАМ	125	1 500	92,0	92,5	0,9	0,89	4,7	1,1	0,234	2,0	2,7	870	2,7	870	11
РАМ	120	1 000	92,0	92,5	0,89	0,87	5,8	1,4	0,241	2,5	2,5	1 040	2,5	1 040	22
РАМ	125	500	91,0	91,5	0,81	0,77	5,2	1,6	0,309	2,3	3,0	1 425	3,0	1 425	61
РАМ	120	1 500	91,5	91,5	0,9	0,89	4,8	1,1	0,230	2,2	2,2	980	2,2	980	12,5
РАМ	115	1 000	91,0	91,0	0,87	0,85	5,5	1,2	0,218	2,4	2,4	1 120	2,4	1 120	24,5
РАМ	125	500	90,5	90,5	0,8	0,76	4,2	1,2	0,292	1,9	3,0	1 875	3,0	1 875	91,5

ლრმა ღრმულიანი მოკლედ შეიზოული როდოიზი

ფაზერი როდოიზი

სტატორის ძაბვა 500 V როდოიზი სკონსტრუქცია რგოდოიზი

სტატორის ძაბვა 500 V როდოიზი ღრმე ღრმე ღრმე

სტატორის ძაბვა 3000 V როდოიზი ღრმე ღრმე ღრმე

$$\Theta = 10 + 55 \left(-\frac{I_1}{I_{111}} \right)^2 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

(42,4)

ოსტრი 2020-ის თანახმად ასინქრონული მანქანის ყველა ძირითად ნაწილებსათვის დადგენილია გადახურების ზღვრული მნიშვნელობები. ამ გადახურების მნიშვნელობები ნაჩვენებია ქვემოთ 28-ე ცხრილში.

გრაგნილების ტემპერატურის აწევა იწვევს მათი იზოლაციის მოძველებას და, ამგვარად, მიყვავართ მანქანის ექსპლუატაციის ვადგნის შემცირებამდე; ამიტომ მანქანის გადახურების წესიერი კონტროლი ნისი წესიერი ექსპლუატაციის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს მომენტს წარმოადგენს.

ძალზე ხშირად ასინქრონული მანქანების დატვირთვა ცვალებადი-ასეთ დროს დიდი დატვირთვების პერიოდები იცვლება მცირე დატვირთვების, ან გამორთვის პერიოდებით. ოსტრი 20020-ის თანახმად არჩევენ მანქანის მუშაობის სამ რეჟიმს:

ცხრილი 28.

ასინქრონული მანქანის ზოგიერთი ნაწილების დახაშვები გადახურება გამაცივებელი ჰაერის ტემპერატურის მიმართ

მანქანის ნაწილი	A		B		
	კლასის იზოლაცია		კლასის იზოლაცია		
	თერმო-მეტრით გაზომვა	გაზომვა წინააღმდეგ მეთოდით	თერმო-მეტრით გაზომვა	გაზომვა წინააღმდეგ მეთოდით	
1. სტატორის გრაგნილი	60	65	70	85	ეს დახაშვები გადახურებები ნაჩვენებია რმ შემთხვევისათვის, როდესაც გამაცივებელი ჰაერის ტემპერატურა არ აღემატება 35°C.
2. ფ.ხური როტორის გრაგნილი	60	65	70	85	
3. როტორის გრაგნილი ციუვის ბორბლის სახით	ამ ნაწილის გადახურება ისეთი უნდა იყოს, რომ ის არ წარმოადგენდეს საშიშროებას ახლო მდებარე ნაწილების იზოლაციისათვის				
4. სტატორის და როტორის ფოლადი	65	—	85	—	
5. საკონტაქტო რგოლები	70	—	90	—	
6. სრიალისა და გორვის საკისრები	45	—	45	—	

1) ხანგრძლივი, 2) ხანმოკლე და 3) ხანმოკლე გამეორებითი. ამ რეჟიმების გრაფიკული გამოსახულება მოცემულია ნახ. 524-ზე. ხანგრძლივი რეჟიმის დროს (ნახ. 524, ა) დროის t_1 და t_2 შუალედები ისეთია, რომ მანქანის ყოველი ნაწილის ტემპერატურა აღწევს მის დამყარებულ მნიშვნელობას. ხანმოკლე რეჟიმის დროს (ნახ. 524, ბ) t_1 შუალედების ხანგრძლიობა არაა საკმარისი დამყარებული ტემპერატურის მიღწევისათვის (შუალედები სტანდარტიზებულია და უდრის $1/2, 1 1/2$ და 2 საათს), ხოლო t_2 შუალედის

ხანგრძლიობა ისეთია, რომ მანქანა მთლიანად ასწრებს გაცივებას. ხანმოკლე რეჟიმში მომუშავე მანქანის ნაწილები t_1 შუალედის განმავლობაში არ უნდა გადახურდეს მეტად, ვიდრე ეს ნაჩვენებია 28-ე ცხრილში.

ხანმოკლე-განმეორებითი რეჟიმის დროს (ნახ. 524, გ) ერთი მუშა.პერიოდის დრო t არ უნდა აღემატებოდეს 10 წუთს. ეს რეჟიმი ხასიათდება შეფარდებით $\frac{t_1}{t}$, რომელსაც ს ამუშაო პერიოდის შეფარდებით ხან-

გრძლიობას უწოდებენ, ამასთან სტანდარტიზებულია შეფარდების სამი წინშენელობა 15, 25 და 40%₀. ხანმოკლე განმეორებით რეჟიმში მანქანის ტემპერატურა არ უნდა აღემატებოდეს 28-ე ცხრილში. დადგენილ საზღვრებს.

ასინქრონული მანქანის ცვალებადი დატვირთვის შემთხვევაში ადგილი აქვს გახურებისა და გაცივების არაღამყარებულ პროცესებს. ამ პროცესების ზუსტი ანგარიში მეტად რთულია. მანქანის გრაგნილი მიახლოებით შეგვიძ-

ლია განვიხილოთ, როგორც დაყვანილი ერთგვაროვანი სხეული და მისი გადახურება განესაზღვროთ იგივე ფორმულით, როგორც, ეს გვექნა ტრანსფორმატორებისათვის:

$$\theta = \theta_0 + (\theta - \theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (42,5)$$

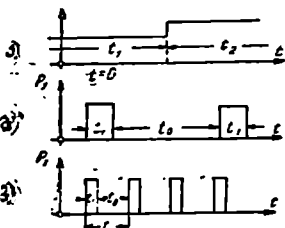
სადაც θ_0 და θ — შესაბამისად გრაგნილის საშუალო ტემპერატურის ნაზრდია გახურების პროცესის საწყის და ბოლო მომენტებში, θ — გრაგნილის საშუალო ტემპერატურის ნამატი t დროის განმავლობაში. დროის მუდმივას T განსაზღვრა ხდება იმ

გარემოების გათვალისწინებით, რომ გრაგნილის საბოლოო ტემპერატურაზე გავლენას ახდენს მანქანის სხვა ნაწილების გახურებაც. ამიტომ დროის მუდმივას T განსაზღვრა ხდება ფორმულით:

$$T = \frac{\sum c G \Theta}{Q} \quad (42,6)$$

აქ c , G , Θ — შესაბამისად ხვედრითი თბოტევადობაა, წონა და მანქანის ცალკეული ნაწილების ტემპერატურის დამყარებული ნაზრდი, Θ — დანაკარგების ჯამი, რომლითაც გაპირობებულია მანქანის ნაწილების გადახურება და რომელიც გათვალისწინებულია (42,6) განტოლების მრიცხველში. ასინქრონული მანქანებისათვის დროის მუდმივა T მოთავსებულია 0,3÷2 საათის ფარგლებში და იზრდება მცირე სიჩქარეების შემთხვევაში.

მანქანის დატვირთვის გრაფიკის განსაზღვრული ფორმისათვის სტატორის გრაგნილის ტემპერატურის მიახლოებითი ანგარიში ხდება ისევე, როგორც ეს ტრანსფორმატორის ზეთისათვის III ნაწ., § 18, (42,3) ან (42,4) განტოლებების მხედველობაში მიღებით. ასეთი ანგარიშის საშუალებით შე-



ნახ. 524. ასინქრონული მანქანის მუშაობის სხვადასხვა რეჟიმები. ხანგრძლივი (ა), ხანმოკლე (ბ), ხანმოკლე-განმეორებითი (გ).

საძლებელია შემოწმებულ იქნას ძრავის ნომინალური სიმძლავრის დატვირთვის პირობებისადმი შესაბამისობა¹.

მთიან ადგილებში ბარომეტრული წნევის შემცირების გამო სითბოს გადაცემა კონვექციის საშუალებით უარესდება და ადგილი აქვს მანქანის გახურების გაზრდას. ამიტომ დანადგარებისათვის, რომლებიც განლაგებულია 1000 მ მაღლა ზღვის დონიდან, გვიხდება მანქანის სიმძლავრე შევამცირეთ 1%-ით, ყოველ 100 მ-ზე 1000 მ-ის ზევით.

ასევე, თუ გარემოს ტემპერატურა აღემატება 25°C, საჭიროა სიმძლავრე შევამცირეთ დაახლოებით 1,5%-ო ყოველ 1°C-ზე 35°C-ზე ზევით.

გ) ახინქრონული მანქანების გაცივება. ელექტრული მანქანის გადახურებული ნაწილებიდან სითბოს გადაცემა წარმოადგენს ერთ-ერთ მთავარ საკითხს, რომელიც წამოიჭრება მანქანის დაგეგმარებისა და ექსპლოატაციის დროს.

სწორად გათვლილი მანქანა, თუ მოხვდა ისეთ პირობებში, რომ გამაცივებელი ჰაერის მიწოდება არასაკმარისი რაოდენობით ხდება, მაშინ უდავოა მისი გადახურება, ისევე როგორც ეს გვექნება მაშინ, როდესაც ცუდად გათვლილი მანქანისათვის შექმნილია გაცივების ნორმალური პირობები.

მანქანის გაცივებისათვის საჭირო ჰაერის რაოდენობა შესაძლებელია მოიძებნოს (5,14) განტოლებიდან:

$$V = \frac{\Delta P}{c \Delta t} \quad (42,7)$$

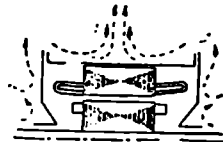
სადაც V —ჰაერის ხარჯია m^3/sec , ΔP —დანაკარგები kW -ში, რომელიც ახურებს ჰაერს, c —ჰაერის მოცულობითი თბოტევადობა, რომელიც ტოლია

$$c = 1,29 \cdot \frac{b}{760} \cdot \frac{273}{273 + t_1} - k IV sec^{\circ}C m^3, \quad (42,8)$$

აქ b —ბარომეტრული წნევაა $mm Hg$ -ში, t_1 —მანქანაში მიწოდებული ჰაერის ტემპერატურა, Δt —მისი გადახურება მანქანაში გავლის დროს.

Δt დამოკიდებულია ვენტილაციის სისტემისაგან და ირყევა ფარგლებში 12÷25°C.

გამცივებელი ჰაერის სწორი მიმართულებისათვის და მისი მაქსიმალური ეფექტიანობისათვის ასინქრონულ მანქანებში მიმართავენ სპეციალურ სავენტილაციო მოწყობილობებს. მათგან ყველაზე ტიპური საშუალებები სქემატურად ნაჩვენებია ნახ. 525—529-ზე.



ნახ. 525. მცირე სიმძლავრის ასინქრონული ძრავების გარე ბუნებრივი გაცივების სქემა.

ნახ. 525-ზე ნაჩვენებია ბუნებრივი გაცივების სქემა, რომელიც გამოყენებულია უმთავრესად არასტაციონარულ დანადგარებში მცირე სიმძლავრის

¹ ძრავის გახურებისა და სიმძლავრის შერჩევის საკითხი ცვალებადი დატვირთვის შემთხვევაში უფრო დაწვრილებითაა განხილული ელექტროამძრავის კურსში.

ძრავებისათვის. ძრავის მიერ გამოყოფილი სითბოს გაფანტვა ამ შემთხვევაში წაოპებს მისი გარცმის ზედაპირის საშუალებით ბუნებრივი კონვექციისა და განოახივების გზით.

ნახ. 526-ზე ნაჩვენებია აქსიალური ვენტილაციის სისტემის სქემა.

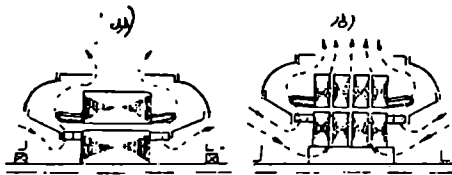
ამ სისტემის დროს ერთი ცხრიდან ლილვზე დამაგრებულია ვენტილატორი, რომელიც მანქანის მეორე მხრიდან გვერდითი ფარის ხვრელებით შეიწოვს ჰაერს. ჰაერი გადის სტატორსა და როტორში გრძივ სავენტილაციო არხებსა და ვადასციმს მათში გამოყოფილ სითბოს. ვენტილაციის აქსიალური სასტემა გამოყენებულია თითქმის ყველა მცირე და საშუალო სიმძლავრის



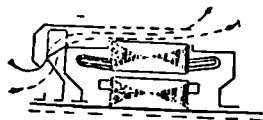
ნახ. 526. აქსიალური ვენტილაციის სისტემის სქემა. სტატორში არხების გარეშე, (მარცხნივ) სტატორში არხების დროს (მარჯვნივ).

(ნახ. 526, ა) და 30÷35 სმ (ნახ. 526, ბ), ეს სისტემა ხდება ნაკლებად ეფექტური.

ნახ. 527-ზე ნაჩვენებია რადიალური ვენტილაციის სისტემის სქემა: ამ სისტემის დროს ვენტილატორის როლს ასრულებს როტორის გრაგნილის გამოშვებული შუბლური ნაწილები. ჰაერის შეწოვა ხდება გვერდითი ფარ-



527. რადიალური ვენტილაციის სქემები სავენტილაციო არხების გარეშე (ა), სავენტილაციო არხებით (ბ).



ნახ. 528. გარე ვენტილაციის სქემა.

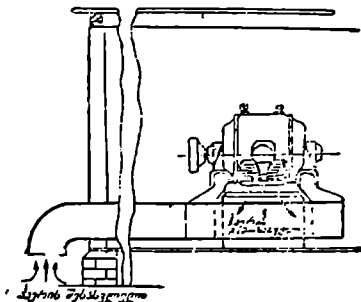
ბას ხვრელებში სიმეტრიულად ორივე მხრიდან, როდესაც ის გაივლის სტატორის გრაგნილის შუბლური ნაწილებისა და სტატორის პაკეტების ახლოს, გადაეცემა გარემოს გარცმის ხვრელების საშუალებით. დიდი, სიმძლავრის მანქანებში (ნახ. 527, ბ), გარდა ამისა, ჰაერი გადის სტატორისა და როტორის პაკეტებს შორის მოწყობილი რადიალური არხების საშუალებით. ვენტილაციის რადიალური სისტემა კონსტრუქციული თვალსაზრისით მეტად მარტივია.

დიდი სიმძლავრის მანქანებში ის უზრუნველყოფს მცირე სავენტილაციო დანაკარგების ქვეშ მანქანის ნებისმიერი სიგრძისათვის ინტენსიურ და თანაბარ სითბოს გადაცემას.

ნახ. 528-ზე ნაჩვენებია გარე გაცივების სქემა. ასეთი ვენტილაცია გამოყენებულია დახურული ძრავებისათვის; სადაც ადგილი არა აქვს მანქანის შიგა ნაწილებსა და გარემოს შორის ჰაერის გადაცემას. მანქანის გარემოს შებერვა მის ლილვზე მოთავსებული ვენტილატორით საშუალებას გვაძლევს საგრძობლად შევამციროთ ძრავის ზომები და წონა. გაცივების ზედაპირის გაზრდის მიზნით ზოგჯერ გარემს აქვს გრძივი წიბოები.

ნესტიან ან მტერიან შენობებში, როდესაც ჰაერი შეიცავს მწვავე ეანგის ორთქლს, ტუტეებს, უმჯობესია გამაკივებელი ჰაერის ძრავთან მიყვანა განვახორციელოთ შენობის გარეთ მოთავსებული სპეციალური მილებით (ნახ. 529). მილში ჰაერის სიჩქარე ირჩევა არა უქეტეს 5 m/s .

ჰაერის მტერისაგან გაწმენდის მიზნით რეკომენდებულია მილში დავაყნოთ ვისცინირებული ფილტრი, რომელშიც მტერის შეკაფება ხდება ზეთის ფენით. ფილტრის გამოყენების დროს საჭიროა მილთან შეხორცებული ვენტილატორის დაყენება, ფილტრია და მილებში ჰაერის წნევის ვარდნის კომპენსაციისათვის.



ნახ. 529. ნესტიან ან მტერიან შენობებში მოთავსებული ძრავისათვის მილებით გამაკივებელი ჰაერის მიყვანა.

წინასიტყვაობა .	3
შესავალი	5
1. ელექტრული მანქანები და მათი დანიშნულება .	5
ა) ელექტრული მანქანების ძირითადი კლასიფიკაცია (5); ბ) ელექტრული მანქანების საერთო ენერგეტიკული სქემა (6).	
2. ელექტროდინამიკის ძირითადი კანონები გამოყენებული ელექტრული მანქანების მიმართ .	8
ა) ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი (8); ბ) სრული დენის კანონი (12); გ) ელექტრომაგნიტური ძალების კანონი (13);	
3. ელექტრული მანქანის შექცევადობის პრინციპი .	17
4. ელექტრული მანქანების ძირითადი სახეები და მათი მოწყობილობის პრინციპი	19
ა) ტრანსფორმატორები (19); ბ) ასინქრონული მანქანები (23); გ) სინქრონული მანქანები (31); დ) კოლექტორული მანქანები (37); ე) კავშირი ელექტრული მანქანის სიმძლავრესა და მის გეომეტრიულ ზომებს შორის (46).	
5. ელექტრული მანქანების მიმართ გამოყენებული თბოგადაცემის ძირითადი კანონები	48
ა) თბოგადაცემა თბოგამტარობის გზით (49); ბ) თბოგადაცემა სხივფენით (51) გ) თბოგადაცემა კონვექციის გზით (52).	
6. ელექტრულ მანქანებში გამოყენებული ძირითადი მასალები .	54
ა) გამტარებისათვის გამოყენებული მასალები (55); ბ) მაგნიტური მასალები (55) გ) განმანხლოებელი მასალები (59).	
7. ელექტრული მანქანის განვითარების მოკლე ისტორია .	62
II. ტრანსფორმატორები	
8. ტრანსფორმატორის მუშა პროცესი .	72
ა) მუშა პროცესის ზოგადი დახასიათება (72); ბ) ტრანსფორმატორის დიფერენციალური განტოლებები (75); გ) ტრანსფორმატორის განტოლებები გულანაში დანაკარგების აღრიცხვით (78); დ) ტრანსფორმატორის ექვტორული დიაგრამა (79); ე) ტრანსფორმატორის შენაცვლების სქემა (81); უქმი სვლის ცდა (82); ხ) მოკლედ შერთვის ცდა (84) თ) მეორადი ძაბვის პროცენტული ცვლილება (86); ი) მარგი ქმედების კოეფიციენტი (88).	
9. ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემა და გრაგნილები .	89
ა) კონსტრუქციის ტიპები (89); ბ) გულანა (91); გ) გრაგნილების ძირითადი ტიპები (93) დ) კონცენტრული გრაგნილების კონსტრუქციები (94); ე) გრაგნილის იზოლაცია და დამატებითი მოწყობილობა (96); ვ) გრაგნილების აღნიშვნები და შერთვები (98); ხ) გრაგნილების შეერთების ჯგუფები (100); თ) შეერთების ჯგუფების შემოწმება ცდის საშუალებით (103).	
10. მოკლეები ტრანსფორმატორის გულანის დამაგნიტების დროს .	104
ა) უქმი სვლის მახასიათებელი (104); ბ) დამაგნიტებელი დენის და ე. მ. ძ.-ის უმაღლესი პარამონიკები (104); გ) კონსტრუქციის გავლენა (110); დ) უქმი სვლის დენის აქტიური მდგენელის გავლენა (110); ე) პროცესები ტრანსფორმატორის ჩართვის დროს (110).	
11. ტრანსფორმატორის პარამეტრების განსაზღვრა განგარიშების გზით .	115
ა) უქმი სვლის პარამეტრები (115); ბ) მოკლედ შერთვის პარამეტრები (118).	
12. მრავალგრაგნილიანი ტრანსფორმატორები	184
ა) სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ძირითადი განტოლებები (124); ბ) სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის შენაცვლების სქემა (125); გ) სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის პარამეტრები (126); დ) ექვტორული დიაგრამები (128); ე) ძაბვის პროცენტული ცვლილება (128); ვ) სიმძლავრეების თანაფარდობა სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორში (129).	

13. ავტორტრანსფორმატორები 13
- ა) მოქმედების პრინციპი და ძირითადი თანაფარდობანი (130); ბ) ძაბვის ვარდნა ავტორტრანსფორმატორებში (132); გ) მოკლედ შერთვის ძაბვა (133); დ) ავტორტრანსფორმატორის მოწყობილობა (134); ე) ავტორტრანსფორმატორის გამოყენება, სფერო (134).
14. ტრანსფორმატორის არასიმეტრიული დატვირთვა 135
- ა) არასიმეტრიული დატვირთვის ზოგადი დახასიათება (135); ბ) გრაგნილების შეერთება სქემით ვარსკვლავი-ვარსკვლავი (137); გ) პირველადი გრაგნილის შეერთება სამკუთხედად, მეორადის—ვარსკვლავად (139); დ) პირველადი გრაგნილის შეერთება ვარსკვლავად მეორადის—სამკუთხედად (140); ე) პირველადი გრაგნილის შეერთება ვარსკვლავად, მეორადის—ვარსკვლავად, დამიწებული ნეტრალური წერტილით (141); ვ) პირველადი გრაგნილის შეერთება სამკუთხედად მეორადის ვარსკვლავად დამიწებულ ნეტრალური წერტილით (144); ხ) გრაგნილების შეერთება სქემით Y/Y_0 სამკუთხედად ჩაკეტილ საკომპენსაციო გრაგნილით (145) თ) ნულოვან, მიმდევრობის წინააღმდეგობა (146); ი) ტრანსფორმატორის მუშაობა ერთი ფაზის გამორთვის დროს (148).
15. ტრანსფორმატორების პარალელური მუშაობა 150
- ა) პირველადი და მეორადი ძაბვების ტოლობის პირობა (150); ბ) გრაგნილების შეერთების ვექტორების ეკვივობის პირობა (153); გ) მოკლედ შერთვის ძაბვების ტოლობის პირობა (153); დ) ენერჯის დანაკარგები პარალელური მუშაობის დროს (157).
16. ძაბვის რეგულირება 157
- ა) რეგულირება დამატებით გამოყენების საშუალებით (157); ბ) რეგულირება გადამრთველის საშუალებით (157); გ) ძაბვის რეგულირება დატვირთვის ქვეშ იანსენის სქემა (158); დ) სქემა დენშემზღვრავი რეაქტორით (160); ე) დამატებითი ტრანსფორმატორები (160); ვ) ნორისის რეგულატორი (162); ხ) კონბი და შტერცელის ფირმის რეგულატორი (163).
17. მოკლედ შერთვის პროცესი 163
- ა) პროცესის საერთო დახასიათება (163); ბ) მოკლედ შერთვის დენის ანგარიში (164); გ) ელექტრომაგნიტური ძალები მოკლედ შერთვის დროს (168); დ) გრაგნილების გახურება მოკლედ შერთვის დროს (173).
18. ტრანსფორმატორის გახურება და გაციელება 173
- ა) გახურების და გაციელების საკითხის მნიშვნელობა (173); ბ) თბური პროცესები ტრანსფორმატორში (174); გ) გახურების და გაციელების განტოლება (175); დ) დროის მუდმივა (177); ე) ტემპერატურის ვადამეტება დამყარებულ რეჟიმის დროს (179); ვ) ტრანსფორმატორის გახურება მისი ცვლადი დატვირთვის დროს (179); ხ) ტრანსფორმატორის გახურება მოკლედ შერთვის დროს (181); თ) ტრანსფორმატორის გაციელების ზეზები (182).
19. გადაძაბვები ტრანსფორმატორებში 185
- ა) მოვლენის ზოგადი დახასიათება (185); ბ) ძაბვის საწყისი განაწილება (187); გ) ელექტრული რყევები გრაგნილში (190); დ) ტრანსფორმატორების დაცვა გადაძაბვებისაგან (191); ე) არამარეზონანსული ტრანსფორმატორი (193); ვ) ნეტრალის დამიწება იმპიდორის საშუალებით (197); ხ) მემდგრადი ტრანსფორმატორი (198).
20. სპეციალური ტრანსფორმატორები 200
- ა) სამუხაზა დენის ტრანსფორმირება ორფაზად (200); ბ) ტრანსფორმატორები ელექტროლუმენებისათვის (201); გ) ტრანსფორმატორები რკალური ელექტროშედულებისათვის (203); დ) სიხშირის განსაზღვრელი (204); ე) კასკადური სქემები (205).
21. თანამედროვე ტრანსფორმატორების დახასიათება და მათი შემდგომი განვითარების პერსპექტივები 206
- ა) სსკ-ში ტრანსფორმატორთშენებლობის მოკლე დახასიათება (106); ბ) თანამედროვე ტრანსფორმატორების კუთვნილი ნაწილები და არმატურა (2.0); გ) ტრანსფორმატორების შემდგომი განვითარების პერსპექტივები (213).
29. ელექტრული მანქანები

22. ე. მ. ძ.-ის აღჭერა ცვლადი დენის გრავნილებში 221
- ა) ერთ ელემენტარში აღჭერული ელექტრომამოძრავებელი ძალა (221); ბ) ღრმულე-
ბის ელექტრომამოძრავებელი ძალების ვარსკვლავი (223); გ) ხვეწში და კოპაში
აღჭერული ელექტრომამოძრავებელი ძალა (224); დ) ერთფაზა გრავნილის ელექ-
ტრომამოძრავებელი ძალა სინუსოიდური არეს შემთხვევაში (226); ე) მრავალ-
ფაზა გრავნილის ელექტრომამოძრავებელი ძალა სინუსოიდური არეს შემთხვე-
ვაში (229); ვ) გრავნილის ელექტრომამოძრავებელი ძალა ნებისმიერი არეს
შემთხვევაში (230); ხ) ს.ნ.ფაზა გრავნილის შერთება ვარსკვლავად და სამუცხბე-
დად (232); თ) უნალესი რიგის ჰარმონიკები ე. მ. ძ.-ის მრულში (234); ი) ე. მ.
ძ.-ის მრულში უნალესი ჰარმონიკების შენეირების საშუალებანი (236).
23. ცვლადი დენის მანქანების გრავნილები (239); ა) საერთო შენიშვნები (239); ბ) გრავ-
ნილების კლასიფიკაცია (241); გ) ცვლადი დენის გრავნილების შექმნის პრინცი-
პი (242); დ) კოპისებური გრავნილი არაერთნაირი ფორმის კოპებში (243);
ე) ტოლსეკციანი კოპისებური გრავნილები (ერთნაირი ფორმის კოპებით) (249);
ვ) ღეროვანი გრავნილები (254); ხ) წილადური გრავნილები (256); თ) ორფაზა
და ერთფაზა გრავნილები (260); ი) ცვლადი დენის სპეციალური გრავნილები (261);
კ) პულსირე დენის აღგზნების გრავნილები (262).
24. ცვლადი დენის გრავნილების დამამაგნიტებელი ძალა 262
- ა) ხაზურ დაკეოროვასა და დამამაგნიტებელ ძალას შორის დამოკიდებულება (262);
ბ) ერთფაზა ეოკოპა გრავნილის დამამაგნიტებელი ძალა (264); გ) ერთკოპა
სამფაზა გრავნილის დამამაგნიტებელი ძალა (168); დ) სამფაზა ერთფენა გრავნი-
ლის დამამაგნიტებელი ძალა ღრმულა მთელი გ რიცხვით პოლუსზე და ფაზაზე
(271); ე) სამფაზა ორფენა გრავნილების დამამაგნიტებელი ძალა ღრმულა
მთელი გ რიცხვი პოლუსზე და ფაზაზე (273); ვ) ორფენა გრავნილის დამამაგნი-
ტებელი ძალა შემოკლებული ბიჯის შემთხვევაში (273); ხ) გრავნილის დამამაგ-
ნიტებელი ძალა, როდესაც ფაზათა რიცხვი ძალზე დიდია (274); თ. სამფაზა
ორფენა გრავნილის დამამაგნიტებელი ძალა, როდესაც გ ძალაზე დიდია (27ა);
ი) საერთო დასკვნები (275).
25. დანაკარგები და მ. ქ. კ. 276
- ა) დანაკარგები სპილენძში (277); ბ) დანაკარგები ფოლადში (280); გ) დანაკარგე-
ბი მუსების კონტაქტში. (284) დ) მექანიკური დანაკარგები (284). ელექ-
ტრული მანქანების მ. ქ. კ. (286);
- IV. ასინქრონული მანქანება 288
26. ასინქრონულ მანქანებში გამოყენებული გრავნილები 289
- ა) სტატორის გრავნილები (289); ბ) როტორის გრავნილები (290).
27. ასინქრონული ძრავი უძრავი როტორის შემთხვევაში (S—1) 292
- ა) საერთო შენიშვნები (292); ბ) სამფაზა მოსაბრუნებელი ტრანსფორმატო-
რი. ფაზათა რეგულატორი (292); გ) სამფაზა ასინქრონული მანქანა, რო-
გორც მარეგულირებელი რეაქტიული კოპა (294); დ) სამფაზა ინდუქციუ-
რი რეგულატორი (297).
28. მბრუნავი წრავალფაზა ასინქრონული ძრავის მუშა პროცესის მიყვანა ტრანს-
ფორმატორის მუშა პროცესამდე 301
- ა) საერთო დებულებები (301); ბ) ასინქრონული ძრავის დამამაგნიტებელი
ძალების სივრცული ვექტორული დიაგრამა (302). გ) სტატორის წრედის ვექტო-
რული დიაგრამა (304); დ) როტორის წრედის ვექტორული დიაგრამები (305);
ე) სტატორისა და როტორის წრედების შუთავსებული ვექტორული დიაგრამა
(308); ვ) ასინქრონული მანქანის მეორადი წრედის დაყვანა პირველადი წრედის
პარამეტრებთან(310).
29. ასინქრონული მანქანის მაგნიტური არე 313

30. ასინქრონული მანქანის მუშაობის გენერატორული და სანეზბრუნო რეჟიმები	317
31. ასინქრონული მანქანის მუშაობის გამოკვლევის ანალიზური ზღრნი .	320
32. ასინქრონული მანქანის მახრუნი მომენტი	322
ა) მახრუნი მომენტის განსახლვრა ელექტრომანგინტრუ ძალთა კანონიდან (322);	
ბ) ასინქრონული მანქანის მახრუნი მომენტის განახლვრა მანგინტრუი არეს მიგრ როტორზე გადაცენული სიმძლავრის საშუალებით (324); გ) მახრუნი მომენტსა და სრაილს შორის დამოკიდებულდების ანალიზი (325); დ) კლსის ფორმულა (228);	
ე) როტორში ჰისტერეზისით და ფუყოს დენებით გაპრობტული მახრუნი მომენტი (329); ვ) სასარგებლო მახრუნი მომენტი ძრავის ლილვზე (332); ზ) სიმძლავრე ასინქრონული მანქანის ლილვზე (333).	
33. ასინქრონული მანქანის ზენაცვლების სქემები	334
34. ასინქრონული მანქანის წრითული დიაგრამა	337
ა) წრითული დიაგრამის დანიშნულება (337); ბ) წრითული დიაგრამების აგება (338);	
გ) ასინქრონული ძრავის მუშაობის დანახსიათებელი ძირითადი სიდიდეების განსახლვრა წრითული დიაგრამიდან (311); დ) წრითული დიაგრამის აგება ლქმი სელისა და მრუდულ შერთვის ცვლარს მონაცემებით (345); ე) წრითული დიაგრამების მარტივი წესით აგება (348); ვ) წრითული დიაგრამის საშუალებით ასინქრონული ძრავის გამოკვლევის სიხსტის შეფუება (350).	
35. მანგინტრუი არეს უმალვები ჰარმონიებითა გავლენა ასინქრონული მანქანის მუშაობაზე .	352
ა) არეს დამამანგინტრუი ძალით გაპრობტული უმალვსი ჰარმონიებით (352);	
ბ) საპურო ლრქის კბილვები ადნაგობით გაპრობტული უმალვსი ჰარმონიებით (353); გ) მანგინტრუი არეს უმალვსი ჰარმონიებით შექმნილი ასინქრონული მომენტები (355); დ) ბრუნვის სინქრონული მომენტები (356); ე) ხნაური ასინქრონული მანქანის მუშაობის დროს (359).	
36. სამფახა ასინქრონული ძრავების გაშვება	360
ა) ძრავის გაშვების ზოგადი დახსიათება (350); ბ) ასინქრონული მანქანის მიგრთება ქსელთან (362); გ) ძრავის გაშვება გაშვების მონენტში (364); დ) ასინქრონული ძრავის გაშვების პროცესში მოახონილი ენერგია (367); ე) გამწვი დენის შემცილება პირველადი ძაბვის დაწვება (359); ვ) გამწვი მახსიათებლების გაშვოგობება როტორის წრედში დამატებითი აქტიური წინააღმდეგობის შეყენებით (372); ზ) სპეციალური შესრულდების როტორების გამოყენება ძრავის გამწვი მახსიათებლების გაშვოგობებისათვის (377).	
37. სამფახა ასინქრონული ძრავის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება და დანეზრულება	367
ა) სამფახა ასინქრონული ძრავების ბრუნვის სიჩქარის რეგულირების შესაძლებელი მეთოდები (387); ბ) სრაილის რეგულირება პირველადი ძაბვის ცვლით (388);	
გ) როტორის წრედში აქტიური წინააღმდეგობის ცვლით სრაილის რეგულირება (389); დ) ძრავის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება პირველადი ქსელის სიხშირის ცვლით (390); ე) ძრავის ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება წრელ პოლუსთა რიცხვის ცვლით (391); ვ) ბრუნვის სიჩქარის რეგულირება კასკადური შეერთების საშუალებით (394); თ) ასინქრონული ძრავების ელექტრული დანეზრულება (397).	
38. ასინქრონული მანქანის მუშაობის განსაკუთრებული რეჟიმები	403
ა) გენერატორის რეჟიმი (403); ბ) სიხშირის გარდნახის რეჟიმი (407); გ) ორმაგი კვების რეჟიმი (408); დ) ელექტრული ლილვის რეჟიმი (411).	
39. ასინქრონული ძრავის მუშაობა ანოვალურ პირობებში	415
40. ერთფახა ასინქრონული ძრავი	423
ა) ერთფახა ასინქრონული ძრავის თეორია (424); ბ) ერთფახა ასინქრონული ძრავის გაშვება (429); გ) ერთფახა კონდენსატორული ძრავები (420); დ) ერთფახა ძრავის შუალედი როტორით (434); ე) ერთფახა ინდუქტიური რეგულატორი (435).	
41. სეგმენტური ასინქრონული ძრავი	436
42. ასინქრონული მანქანების დანაკარგები, გაზურება და გაცივება	438
ა) ასინქრონული მანქანების სიმძლავრის დანაკარგები და მ. კ. კ. (438); ბ) ასინქრონული მანქანების გაზურება (440); გ) ასინქრონული მანქანების გაცივება (445).	

Г. П. ПЕТРОВ, Н. В. ГОРОХОВ, Ф. А. ГОРЯИНОВ
М. В. ЛНПКОВСКИЙ, Е. В. НИТУСОВ, П. С. СЕРГЕЕВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

(На грузинском языке)

Редактор канд. тех. наук доц. В. Г. ЛОМНАДЗЕ

Техредактор Г. Г. Джа вел п д з е

Гостехиздат Грузинской ССР

„Техნიკა და შრომა“

Тбилиси—1957

რედაქტორი ტქნ. მეცნ. კანდ. დოც. ვ. გ. ლომინაძე

მთარგმნელები { გ. შ. შაშვარლაშვილი
 { ტუხ. ფეც. კანდ. დოც. ა. მ. ქიქმედიანი

გამომც. რედაქტორი ა. ხოლოლაშვილი

კორექტორი ნ. აბდუშელიშვილი.

ტექრედაქტორი გ. ჯანელიძე

გამომშები გ. აბდლაძე

ტირაჟი 2000.

შეკვეთა № 1814

გადეცა ასაწყობად 28/VIII-56 წ. ხელმოწერილია დასაბეჭდად 22/II-57 წ.,
ანაწყობის ხომა 7×11, ქალაღის ხომა 70×108, სასტამბო ფურცელთა
რაოდენობა 28,25.

საქართველოს სსრ კულტურის სამინისტროს გამომცემლობისა და პოლი-
გრაფიული მრეწველობის მთავარი სამმართველოს სტამბა № 2.
თბილისი, ფურცელაღის ქ. 5.

Типография № 2 Главного управления издательств и полиграфиче-
ской промышленности Министерства культуры Грузинской ССР.
Тбилиси, ул. Пурцеладае № 5.