



საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ლამა მაისურაძე

**საავიაციო აირტურბინული ძრავებისათვის ელექტროძრავა-
გენერატორული მოწყობილობების პარამეტრების ოპტიმიზაცია**

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარმოდგენილი
დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა :

„საფრენი აპარატების დაპროექტება“

შიფრი: 0715

თბილისი

2021 წელი

ნაშრომი შესრულებულია საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის საინჟინრო
ფაკულტეტზე

სამეცნიერო ხელმძღვანელი :

ზურაბ გობიანიძე

სტუ-ის ასოცირებული პროფესორი

რეცენზენტები:

დემური ვეფხვაძე

სსუ-ის საინჟინრო ფაკულტეტის პროფესორი

თამაზ კობრიძე

სტუ-ის ენერგეტიკის ფაკულტეტის პროფესორი

დაცვა შედგება 2021 წლისსაათზე, საქართველოს
საავიაციო უნივერსიტეტის სადისერტაციო საბჭოს სხდომაზე, სსუ I კორპუსი,
საკონფერენციო დარბაზი.

მისამართი: 0103, თბილისი, ქეთევან წამებულის გამზირი 16.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის
ბიბლიოთეკაში.

ავტორეფერატის უნივერსიტეტის ვებგვერდზე WWW.SSU.@EDU.GE.

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში.

სადისერტაციო საბჭოს სწავლული მდივანი

პროფესორი

ავთანდილ აფხაიძე

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალურობა: სადისერტაციო ნაშრომი ეხება საფრენი აპარატების ელექტროძრავა - გენერატორული მოწყობილების ოპტიმალური ვარიანტის პროექტირების საკითხებს.

დღეისათვის საფრენი აპარატების ცალკეული კვანძების მიმართ წაყენებული მოთხოვნები გამკაცრებულია, ძირითადი მოთხოვნები ეხება საიმედობის საკითხებს და დასაპროექტებელი ნაკეთობების მასა გაბარიტებს. არსებული ელექტროძრავა - გენერატორების კვანძი წარმოადგენს მუდმივი დენის ელექტრომექანიკურ გარდამქმნელს, რომლის ძირითად ნაწილს შეადგენს მუსა - კოლექტორი. მუსა - კოლექტორის უარყოფითი მხარეა კონტაქტების არსებობა, მუდმივი კომუტაციის (ჩართვა - გამორთვის) რეჟიმი, რომელიც იწვევს საიმედობის პირობების მკვეთრ გაუარესებას, ნაპერწკლიანობის, მუსების ცვეთის ა.შ. სხვადასხვა პირობების გაუარესებას.

ნაშრომში მრავალი არსებული ელექტროძრავა - გენერატორებიდან შერჩეული იქნა მაღალი ტექნიკური მონაცემების მუდმივმაგნიტებიანი, კლასიკური შესრულების სამფაზა უკონტაქტო ძრავა, რომელიც თვისობრივად განსხვავდება პრაქტიკაში არსებული ძრავა - გენერატორისაგან და ახასიათებს მრავალი უპირატესობა, როგორც საიმედობის ასევე ელექტროტექნიკური და მასაგაბარიტული მაჩვენებლების თვალსაზრისით. აქედან გამომდინარე ნაშრომი იძენს აქტუალურობას.

ნაშრომის მიზანი: ნებისმიერი ელექტრომექანიკური გარდამქმნელი, კერძოდ ძრავა - გენერატორი პროექტირების პირველ ეტაპზე მოითხოვს აპრიორული მონაცემების ცოდნას. ოპტიმალური პროექტირების წინასწარ ეტაპზე აუცილებელია ვიცოდეთ ისეთი გამოსასვლელი პარამეტრები როგორიცაა სიმძლავრე და მარგი ქმედების კოეფიციენტი. მიახლოებით დავადგინოთ შემავალი ცვლადი პარამეტრების ცვლილებების ზღვრები, მაგნიტოგამტარის დიამეტრი, სიგრძე და მათი თანაფარდობა, ელექტრომაგნიტური დატვირთვების, როგორიცაა დასაშვები მაგნიტური ინდუქციები ცალკეულ უბანზე, ხაზოვანი დატვირთვები და ა.შ. დღეისათვის ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი მონაცემები წარმოდგენილია მრუდების, ცხრილებისა და ემპირიული ფორმულების სახით.

ნაშრომში გამოყენებული ოპტიმალური პროექტირების მეთოდი მათემატიკის სხვა ხერხებთან ერთად (როგორიცაა ექსპერიმენტის დაგეგმა, რეგრესიული ანალიზი, მათემატიკური სტატისტიკა, მსგავსების თეორია და სხვა) საშუალებას იძლევა

პროექტირების აპრიორული მონაცემები წარმოვადგინოთ ეგრეთწოდებული დადებითი ნორმალიზებული მასების და ცვლადი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლების საშუალებით და მიღებული ინფორმაცია გავავრცოთ სხვადასხვა სიმძლავრის ძრავა - გენერატორებზე. შექმნილი მეთოდის საშუალებას იძლევა მოდელიდან ან ერთი სიმძლავრის ძრავა - გენერატორიდან მიღებული ინფორმაცია გავავრცელოთ მსგავსი ნაკეთობის სხვადასხვა სიმძლავრის ნაკეთობაზე.

3. მეცნიერული სიახლე. ძრავა - გენერატორის დამახასიათებელი გამოსავალი ფუნქციები წარმოადგენენ მრავალწევრებს ან ერთწევრებს. ისინი დამოკიდებული არიან შემავალი ცვლადი პარამეტრების სიდიდეებზე და უშუალო კავშირში იმყოფებიან ერთმანეთთან. პროექტირების შემავალი სიდიდეები შეიძლება იყოს მუდმივი ან ცვლადი, აბსოლუტური ან ფარდობითი, დაყვანილი ან მიყვანილი სიდიდეები და ა.შ.

გეომეტრიული პროგრამირებისა და მათემატიკაში არსებული სხვა ხერხების ერთობლივმა გამოყენებამ საშუალება მოგვცა ძრავა - გენერატორის დამახასიათებელი პროექტირების ფუნქციები წარმოვადგინოთ სულ სხვა, თვისობრივად განსხვავებული ეგრეთწოდებული დადებითი ნორმალიზებული მასებისა და ხარისხის მაჩვენებლების სახით. ასე მაგალითად ძრავა - გენერატორის ელექტროტექნიკური მასალების (დენგამტარები და მაგნიტოგამტარები) ჯამური მასა წარმოადგენს მრავალწევრს, რომლის თითოეული შესაკრები თავის მხრივ დამოკიდებულია პროექტირების შემავალ ცვლად სიდიდეებზე. მისი წარმოდგენა შესაძლებელი გახდა ერთწევრის საშუალებით, რომელიც წარმოადგენს ხარისხის მაჩვენებელში აყვანილ ცვლადი შემავალი სიდიდეების ნამრავლს. ხარისხის მაჩვენებლები არიან მაღალი ხარისხის განზოგადოებული სიდიდეები და მათი საშუალებით შესაძლებელი გახდა ერთი ძრავა- გენერატორის მონაცემები გავავრცოთ სხვა სიმძლავრის მქონე ძრავა- გენერატორის სერიაზე. ხარისხის მაჩვენებლები გვიჩვენებენ თუ რა წვლილი მიუძღვით ამა თუ იმ ცვლად შემავალ პარამეტრს პროექტირების გამოსავალი ფუნქციის სიდიდეზე.

პრაქტიკული გამოყენება. ნებისმიერი ელექტრომექანიკური გარდამქმნელის ოპტიმალური პროექტირება წარმოუდგენელია აპრიორული ცნობების გარეშე, რომლებიც დღეისათვის გაბნეულია ცხრილების, მრუდების და ემპირიული ფორმულების სახით. მათი შენახვა დაკომპლექტება და წარმოდგენა უფრო კომპაქტური სახით შესაძლებელი გახდა გეომეტრიული პროგრამირების ეგრეთ წოდებული დადებითი ნორმალიზებული მასებისა

და ცვლადი შემავალი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლების გამოყენების შედეგად. ხარისხის მაჩვენებლების გამოყენება საშუალებას იძლევა მოვახდინოთ მაღალი რანგის განზოგადოება და აბსოლუტური, ფარდობითი სიდიდეებისაგან განსხვავებით, გავავრცელოთ ინფორმაცია დიდი სიმძლავრის მსგავს ნაკეთობებზე. შევამციროთ ოპტიმალური ვარიანტის ძებნის სფეროები და ინტერვალები. შევამციროთ ძიების დრო და გავამარტივოთ ოპტიმიზაციის ამოცანა.

შედეგების სიზუსტე (უტყუარობა) . ნაშრომის პრაქტიკული ნაწილი მოიცავს რამდენიმე ეტაპს:

ა) ძრავა - გენერატორის (მცირე სიმძლავრის) დამზადება;

ბ) ძრავა - გენერატორის გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდის შექმნა, რომელიც საშუალებას იძლევა როგორც ძრავულ ასევე გენერატორულ რეჟიმში გამოიცადოს მოდელი ან საცდელი ნიმუში;

გ) გამოცდის მეთოდის დამუშავება, რომელიც საშუალებას იძლევა ძრავა - გენერატორი გამოიცადოს, როგორც ნომინალურ ასევე ავარიულ რეჟიმებში;

დ)გენერატორულ რეჟიმში ძრავა - გენერატორის ყველა საჭირო პარამეტრების დაფიქსირება და ანალიზის ჩატარება, ზემოთჩამოთვლილი სამუშაოების ჩატარება საშუალებას იძლევა შევადაროთ თეორიული და პრაქტიკული მონაცემები და გავაკეთოთ შესაბამისი დასკვნები.

სამუშაოს აპრობაცია: სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა სსუ სტუდენტთა საერთაშორისო კონფერენციებზე:

- დოქტორანტი ლაშა მაისურაძე, ხელმძღვანელი სტუ-ის პროფესორი ზურაბ გობიანიძე „აირტურბინული ძრავას ვენტილატორში ინტეგრირებული ძრავა-გენერატორული მოწყობილობის პარამეტრების ოპტიმიზაცია“ მოხსენებათა თეზისები 25-26 მაისი სტუდენტთა მე-12 საერთაშორისო კონფერენცია თბილისი 2018 წ. (17-19).

- დოქტორანტი ლაშა მაისურაძე, ბაკალავრი თემურ გახარია ხელმძღვანელი სტუ-ის ასოცირებული პროფესორი ზურაბ გობიანიძე „საავიაციო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების დაპროექტების ოპტიმიზაცია მინიმალური მასით და

ელექტრიტიქნიკური მასალემით“ მოხსენებათა თეზისები 28-29 მაისი სტუდენტთა მე-13 საერთაშორისო კონფერენცია თბილისი 2019 წ. (39-40).

და ასევე სსუ-ის სადოქტორო საბჭოზე თეორიულ-ექსპერიმენტალური კვლევა/კოლოქვიუმების სახით.

პუბლიკაციები: დისერტაციის ძირითადი მასალების მიხედვით გამოქვეყნებულია 4 სამეცნიერო შრომა და 1 გამოგონება თანაავტორებთან ერთად

1. ა. მაისურაძე, ლ. მაისურაძე პატენტი გამოგონებაზე GE P 2017 6732 B „სამკონტურირანი ტურბორეაქტიული ძრავა”

2. A. Maisuradze, L. Maisuradze, Z. Gobianidze

PROCEEDINGS OF MECHANICS 2016 The International Conference on Mechanics 2016
OPNIMIZACION OF DESIGN SCHEMES AND PARAMETRES OF MOTOR-GENERATORS FOR AVIATION GAS TURBINE ENGINES (163-170)

3. A. Maisuradze, L. Maisuradze, Z. Gobianidze

„OPTIMIZACION OF DESIGN SCHEMES AND PARAMETRES OF MOTOR-GENERATORS FOR AVIATION GAS TURBINE ENGINES” AIR TRANSPORT
Aviation University of Georgia №1(12)/2017 TBILISI (79-89)

4. докторант Лаша Маисурадзе, Зураб Гобианидзе „Вопросы предварительного расчета оптимального электромеханического преобразователя энергии с помощью степенных показателей геометрического программирования” ENERGY №3(91) თბილისი, (30-32)

5. G. I. Mamniashvili, D. I. Gventsadze, L. N. Rukhadze, L. A. Maisuradze

WORLD JOURNAL OF CONDENSED MATTER PHYSICS (კონდენსირებული ფიზიკის გარემოს მსოფლიო ჟურნალი)

Fabrication of polymer magnetic nanocomposites containing carbon nanoparticles doped with cobalt nanostructures and study their conductivity, self-healing and adhesion properties

სამუშაოს მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება 5 თავისაგან, გადმოცემულია 145 ნაბეჭდ გვერდზე და მოიცავს 76 ნახაზს, 7 ცხრილს. გამოყენებული ლიტერატურის სია მოიცავს 31 დასახელებას.

რეზიუმე

სადისერტაციო ნაშრომის „საავიაციო აირტურბინული ძრავებისათვის ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პარამეტრების ოპტიმიზაცია” ძირითადი მიზანია საჰაერო ხომალდების აირტურბინულ ძრავებში გამოყენებული ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობების ალტერნატიული ვარიანტის დაპროექტება და დამზადება რომელიც გამორჩეული იქნება გაუმჯობესებული მახასიათებლებით, კერძოდ მაღალი საიმედოობით, მცირე მასაგაბარიტებით, ნაკლები თვითღირებულებით და სხვა.

საჰაერო ხომალდების საფრენოსნო-ტექნიკური მონაცემების თვისობრივად გაუმჯობესების მიზნით მსოფლიო საავიაციო ინდუსტრიის მიერ შემუშავებულია „მთლიანად ელექტროფიცირებული თვითმფრინავის“ კონცეფცია რომლის რეალიზაციის პრობლემატურ საკითხებს უკავშირდება აირტურბინულ ძრავებში არსებული მექანიკური დანაკარგების შემცირება (ან მათი მთლიანად აღმოფხვრა) რომელიც იხარჯება პირველ შემთხვევაში საჰაერო ხომალდების ელექტრო კვების ცვლადი და მუდმივი დენის გენერატორების და მეორე შემთხვევაში ელექტრო გამზების (სტარტერ-გენერატორის) ან საჰაერო გამზების სისტემის კვანძების (საჰაერო ტურბინა და მასთან დაკავშირებული კბილანური გადაცემები) აძვრაზე რომლებიც მოქმედებაში მოდიან აირტურბინული ძრავების როტორებიდან გადაცემული სიმძლავრით. უნდა აღინიშნოს, რომ უახლესი ტიპის საჰაერო ხომალდების ელექტროკვების გაზრდილი მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად გენერატორებით გამომუშავებული სიმძლავრეები განუხრელად იზრდება. ასე მაგალითად თუ პირველი თაობის საჰაერო ხომალდების Boeing 737 Original და Boeing 737 Classic ტურბოვენტილატორულ ძრავებზე CFM-56 დაყენებული გენერატორების სიმძლავრე შეადგენდა 40 კვტ-ს, მომდევნო თაობის Boeing 737 Next Generation-ზე არსებული გენერატორების სიმძლავრე გაიზარდა 90 კვტ-დე, ხოლო საჰაერო ხომალდ Boeing 777—300ER-ის ტურბოვენტილატორულ ძრავებზე General Electric GE90-115B (510 კნ) დაყენებული იქნა ორი გენერატორი და თითოეულის სიმძლავრე შეადგენს 250 კვტ-ს.

ზემოთ აღნიშნულის გათვალისწინებით საავიაციო აირტურბინული ძრავების ტექნიკურ და საექსპლუატაციო მახასიათებლების შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით მიზანშეწონილია მოხდეს გამზების სისტემის და გენერატორული მოწყობილობების ინტეგრირება ძრავების ვენტილატორის და კომპრესორების კვანძებში (როტორებში და მათ შესაბამის კორპუსებში) რითაც უზრუნველყოფილი იქნება მაღალი ენერგეტიკული სიმძლავრეების რეალიზაცია მექანიკური დანაკარგების გარეშე. ასეთი კონსტრუქციული გადაწყვეტილება საფუძველს უყრის ჰიბრიდული აირტურბინული ძრავას შექმნის რეალიზაციის რაც ძალზე მნიშვნელოვანია როგორც ეკონომიური ასევე ეკოლოგიური თვალსაზრისით.

ძრავა-გენერატორულ მოწყობილობად ხშირ შემთხვევაში გამოიყენება მუდმივი დენის კოლექტორული ძრავები მუდმივი მაგნიტების აღგზნებით. ამ შემთხვევაში ღუზა

რომელშიც განთავსებულია ელექტროგრაგნილები წარმოადგენს როტორს, ხოლო მუდმივი მაგნიტები მოთავსებულია სტატორში. ამ ძრავებს გააჩნიათ მაღალი მქ და შეიძლება გამოყენებული იქნენ სერვოდრავებადაც. მათ ნაკლოვან მხარეს მიეკუთვნება მუსა-კოლექტორის კვანძის არსებობა რომელიც ექსლუატაციის პროცესში იცვითება და საჭიროებს ძრავას მიმდინარე რემონტის ჩატარებას, რაც საგრძნობლად აუარესებს საიმედობის მაჩვენებლებს. არსებობენ ასევე მუდმივი დენის უკონტაქტო ვენტილური ძრავები რომლებშიც აღნიშნული ნაკლოვანება აღმოფხვრილია მუსა-კოლექტორული კვანძის შეცვლით სადაც მათ ფუნქციას ასრულებენ ტრანზისტორული ან ტირისტორული ინვენტორები. ამ შემთხვევაში დუზის გრაგნილები მოთავსებულია სტატორში ხოლო როტორი შედგება ერთი ან რამდენიმე მუდმივი მაგნიტისაგან. ცნობილია ასევე ცვლადი დენის სინქრონული ძრავა მუდმივი მაგნიტებით რომლის კონსტრუქცია მცირედ განსხვავდება მუდმივი დენის უკონტაქტო ვენტილური ძრავასაგან.

აღნიშნულის გათვალისწინებით მოცემულ სამუშაოში განხილულია მუდმივმაგნიტებიანი (მაღალი ტექნიკურ მაჩვენებლიანი) კლასიკური შესრულების სამი ან მრავალფაზა ცვლადი დენის უკონტაქტი ძრავა-გენერატორი.

იმასთან დაკავშირებით, რომ როგორც მუდმივი დენის ასევე ცვლადი დენის ძრავა-გენერატორულ მოწყობილობების მაღალი საექსპლუატაციო მახასიათებლების მისაღებად მნიშვნელოვანი როლი აკისრიათ მუდმივ მაგნიტებს ამიტომ მოცემულ სადოქტორო ნაშრომში დიდი ყურადღება აქვს დათმობილი არსებული მუდმივი მაგნიტების შედარებით ანალიზს როლებიც დამზადებული არიან როგორც იშვიათ მიწათა (ნეოდიუმ-რკინა-ბორი Nd-Fe-B, სამარიუმ-კობალტის SmCo) ასევე იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველ ელემენტებისაგან კერძოდ, კობალტის ნანომავთულების ბაზაზე შემუშავებული ახალი ტექნოლოგიებით (ქიმიური დალექვის მეთოდი და დარტმითი ტალღით ცხლად დაწნეხვის მეთოდი). როგორც ცნობილია იშვიათ მიწათა მეტალების შენადნობებისაგან დამზადებული მუდმივი მაგნიტები ძირითად იწარმოება ჩინეთში და რომელზედაც საბაზრო ფასები განიცდის მკვეთრ რყევებს. აქედან გამომდინარე დღეისათვის მსოფლიოს წამყვან სამეცნიერო წრეებში ძალზე აქტუალურია მუდმივი მაგნიტების მიღება რომელთაც გააჩნიათ არსებულ მაგნიტებთან მიახლოებული მახასიათებლები მაგრამ არ შეიცავენ (ან შეიცავენ მცირე რაოდენობით) იშვიათ მიწათა ელემენტებს. როგორც პირველადმა გამოკვლებმა აჩვენა ქართველი მეცნიერების მიერ ნანოტექნოლოგიებით შემუშავებული მუდმივი მაგნიტების ნიმუშები როლებიც დამზადებული არიან იშვიათ მიწათა მეტალების

არშემცველ ელემენტებისაგან ზოგიერთ კომპონენტებში აღმატებიან იშვიათმიწათა მეტალების ელემენტებისაგან დამზადებულ მაგნიტებს, მაგალითად სიიაფით და მაღალტემპერატურულ გამოყენებებში 250°C-ზე ზევით, სადაც NedFeB მაგნიტების გამოყენება არ არის შესაძლებელი. აქედან გამომდინარე ეს საკითხი ძალზედ აქტუალურია და მოითხოვს შესაბამის ძალისხმევას რათა კონკრეტული ექსპერიმენტალური ძრავა-გენერატორული მოწყობილობისათვის დამზადდეს და პრაქტიკულად გამოიყენდეს მდმივი მაგნიტების ნიმუშები იშვიათ მიწათა არშემცველი მეტალების ელემენტების გარეშე.

ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობის ოპტიმალური პროექტირების პროცესი შედგება ორი ეტაპისაგან. პირველ ეტაპზე განხილულია ძრავალკრიტერიუმინი ამოცანა, რომელიც იძლევა საშუალებას უამრავი არსებული ძრავა-გენერატორების ტიპებიდან ავირჩიოთ ჩვენთვის სასურველი, საუკეთესო ვარიანტი. მეორე ეტაპზე გამოყენებულია პროგრამირების შედარებით თანამედროვე მეთოდები, კერძოდ გეომეტრიული პროგრამირების მეთოდი. გეომეტრიული პროგრამირების გამოყენება საშუალებას იძლევა მოიძებნოს გლობალური ოპტიმალური ვარიანტი და დავაპროექტოთ ძრავა-გენერატორი ელექტროტექნიკური მასალების მასების მინიმიზაციით.

გეომეტრიული პროგრამირებაში გამოყენებულია მაღალი ხარისხის განზოგადოებული სიდიდეები, კერძოდ ძრავალი ცვლადის მიზნობრივად შემზღუდავი ფუნქციის ხარისხის მაჩვენებლები. აღნიშნული ხარისხის მაჩვენებლები საშუალებას იძლევა არსებული ინფორმაცია გავავრცელოთ სხვადასხვა სიმძლავრის მსგავს ძრავა-გენერატორებზე.

მიზნობრივად შემზღუდავი ფუნქციის საშუალებით ძრავა-გენერატორის მათემატიკური მოდელის შექმნა შესაძლებელი გახდა მას შემდეგ რაც კომბინაციურ სტილში გამოყენებული იქნა ექსპერიმენტის დაგეგმა, რეგრესიული ანალიზი და მათემატიკური სტატისტიკის არსებული ხერხები.

ნაშრომში შემზღუდავი ფუნქციები, როგორცაა მაგნიტური და ელექტრული დანაკარგები, სიმძლავრისა და მარგი ქმედების კოეფიციენტი, ცალკეული დეტალების, მაგნიტოგამტარების და ლენგამტარების გადახურების ტემპერატურები და ა.შ. წარმოდგენილია განყენებული ხასიათის რიცხვების საშუალებით - ე.წ. ხარისხის მაჩვენებლებით. მათი გამოყენება საშუალებას იძლევა ინფორმაცია გავავრცელოთ ერთი

ტიპის სხვადასხვა სიმძლავრის ძრავა-გენერატორებზე. ასეთი მიდგომა პროექტირების საწყის ეტაპზე საგრძნობლად ამარტივებს ოპტიმალური ვარიანტის პოვნას, საშუალებას იძლევა იოლად შევირჩიოთ ახალი ორიენტირი და შესაბამისად ახალი საძიებო საჭირო ინტერვალები ცვლადი სიდიდეებისათვის. ოპტიმალური პროექტირება ჩატარებულია კომპიუტერული მოდელირების პროგრამული სისტემის **Matlab/Simulink**-ის გამოყენებით, რომელიც საშუალებას იძლევა დაგროვილი თეორიული მასალა გავავრცელოთ მსგავს სხვადასხვა სიმძლავრის ძრავა-გენერატორებზე.

უნივერსალური ექსპერიმენტალური სტენდის საშუალებით ჩატარდა ძრავა-გენერატორული მოდელის გამოსავალი პარამეტრების გამოკვლევა, ერთფაზა, ორფაზა და სამფაზა მ.შ. რეჟიმების შემთხვევაში.

სადისერტაციო ნაშრომი საშუალებას იძლევა საგრძნობლად გავაიოლოდ პროექტირების წინასწარი ეტაპები ელექტროძრავა-გენერატორის ოპტიმალური ვარიანტის შესაქმნელად.

Summary

The main goal of the dissertation is to "Optimize the parameters of electric motor-generator devices for aviation turbine engines" is to design and manufacture of alternative versions of electric motor-generator equipment used in aircraft turbine engines, which will be distinguished by improved characteristics, in particular high reliability, small mass, lower cost and more.

In order to improve the quality of aircraft technical data, the world aviation industry has developed the concept of "fully electrified aircraft", the implementation of which is related to the reduction of mechanical losses in air turbine engines (or their complete elimination) spent in the first case In the case of power generators and, in the second case, electric jets (starter-generator) or air junction system knots (air turbine and related gear transmissions) that come into operation with the power transmitted from the rotor of the air turbine engines. It should be noted that the capacities generated by generators are steadily increasing to meet the increased demand for the latest types of aircraft power supplies. So for example, if the power of the CFM-56 generators installed on the first generation Boeing 737 Original and Boeing 737 Classic generators output power was 40 kW, the power of the generators on the next generation Boeing 737 (Next Generation) increased to 90 kW,

and the Boeing 777 —300ER with turbofan engines General Electric GE90-115B (510 kN) have two generators and each has a capacity of 250 kW.

In view of the above, in order to further improve the technical and operational characteristics of aircraft air turbine engines, it is advisable to integrate the start-up system and generator equipment into the engine fan and compressor units (rotors and their respective housings) without ensuring high energy efficiency. Such a constructive decision lays the foundation for the realization of the creation of a hybrid air turbine engine, which is very important both economically and ecologically.

As a motor-generator device is often used constant current collector motors with excitation of constant magnets. In this case the nozzle in which the electrodes are placed is the rotor while the permanent magnets are placed in the stator. These engines have a high activity coefficient and can also be used for servomotors. Their disadvantage is the presence of a mouse-collector node which wears out during operation and requires ongoing engine repair, which significantly worsens the reliability. There are also DC non-contact valve motors in which this defect is eliminated by replacing the mouse-collector node where their function is performed by transistor or thyristor inverters. In this case the nut windings are placed in the stator while the rotor consists of one or more permanent magnets. It is also known as a variable current synchronous motor with permanent magnets whose construction is slightly different from that of a DC non-contact valve motor.

Considering the above, the given work discusses the contactless motor-generator of three- or multi-phase alternating current of high-performance (high technical performance) classic performance.

Due to the fact that permanent magnets play an important role in obtaining high performance characteristics of both DC and AC motor-generator devices, therefore in this doctoral dissertation much attention is paid to the comparative analysis of existing permanent magnets. Nd-Fe-B, Samarium-Cobalt Sm-Co) is also made from non-metallic elements of rare earth metals, in particular with new technologies developed on the basis of cobalt nanomaterial (chemical precipitation method and hot pressing method with kick wave). As it is known, permanent magnets made of rare earth metal alloys are mainly produced in China and on which market prices are experiencing sharp fluctuations. Therefore, it is very important today in the world's leading scientific circles to obtain permanent magnets that have characteristics close to existing magnets but do not contain (or contain in small quantities) rare earth elements. As the first research showed, the samples of

permanent magnets developed by Georgian scientists using nanotechnologies are also made of rare earth metal-free elements. Therefore, this issue is very urgent and requires appropriate efforts to make a specific experimental engine-generator device and to practice a sample of permanent magnets without rare earth metal-containing metal elements. For example, in cheap and high temperature applications above 250 ° C where Nd-Fe-B magnets cannot be used. Therefore, this issue is very urgent and requires appropriate efforts to make a specific experimental engine-generator device and to practice a sample of permanent magnets without rare earth metal-containing metal elements.

The process of optimal design of an electric motor-generator device consists of two stages. In the first stage, a multi-criteria task is discussed, which allows us to choose the best option we want from the many types of existing motor-generators. In the second stage, relatively modern methods of programming are used, namely the method of geometric programming. The use of geometric programming makes it possible to find the global optimal option and design the motor-generator by minimizing the masses of the electro technical materials.

High-quality generalized values are used in geometric programming, namely quality indicators of functionally limiting function of many variables. These quality indicators allow us to disseminate the available information on similar generators of different capacities.

Through the purpose of limiting function, it became possible to create a mathematical model of the engine-generator after the experimental style was used to plan the experiment, regression analysis and existing methods of mathematical statistics.

Limiting functions in the paper, such as magnetic and electrical losses, power and efficiency coefficient, overlap temperatures of individual details, conductors and conductors, etc. It is represented by the numbers of the separated character - the so-called with quality indicators. Their use allows us to disseminate information on different types of power generators. Such an approach greatly simplifies the search for the optimal option at the initial stage of design, allowing us to easily select a new landmark and consequently new search required intervals for variable values. Optimal design is carried out using Mat Lab methods, which allows to distribute the accumulated theoretical material motor-generators of similar different power.

The solution of the solution parameters of the engine-generator model, single-phase, two-phase and three-phase, etc. was carried out by means of a universal experimental stand. In the case of modes.

The dissertation allows to significantly simplify the preliminary stages of design to create the optimal version of the electric motor-generator.

ნაშრომის შინაარსი

პირველ თავში განხილულია საავიაციო აირტურბუნიული ძრავებისათვის ელექტრო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების კონსტრუქციული სქემების მიმოხილვა.

თანამედროვე საჰაერო ხომალდების საფრენოსნო ტექნიკური მახასიათებლების და საექსპლუატაციო მონაცემების შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით საზღვარგარეთის წამყვანი საავიაციო ფირმების მიერ მიმდინარეობს სამეცნიერო კვლევითი სამუშაოები შემდეგი მიმართულებებით: საჰაერო ხომალდებისა და ძრავების პერსპექტიული კონსტრუქციული სქემების და დამზადების ტექნოლოგიების შემუშავება, აგრეგატების მასა - გაბარიტული მაჩვენებლების გაუმჯობესება, ტექნიკური მომსახურების დანახარჯების შემცირება, საწვავისა და შემზეთი მასალების ხარჯის შემცირება, დეტალებისა და კვანძების დამზადება 3D პრინტერის გამოყენებით (მოცულობითი ბეჭედა), გაუმჯობესებული მახასიათებლებიანი მუდმივი მაგნიტების გამოყენებით ელექტრო ძრავებისა და გენერატორების დაპროექტება, საერთაშორისო ნორმებით დადგენილი ეკოლოგიური მაჩვენებლების შემდგომი გაუმჯობესება და სხვა.

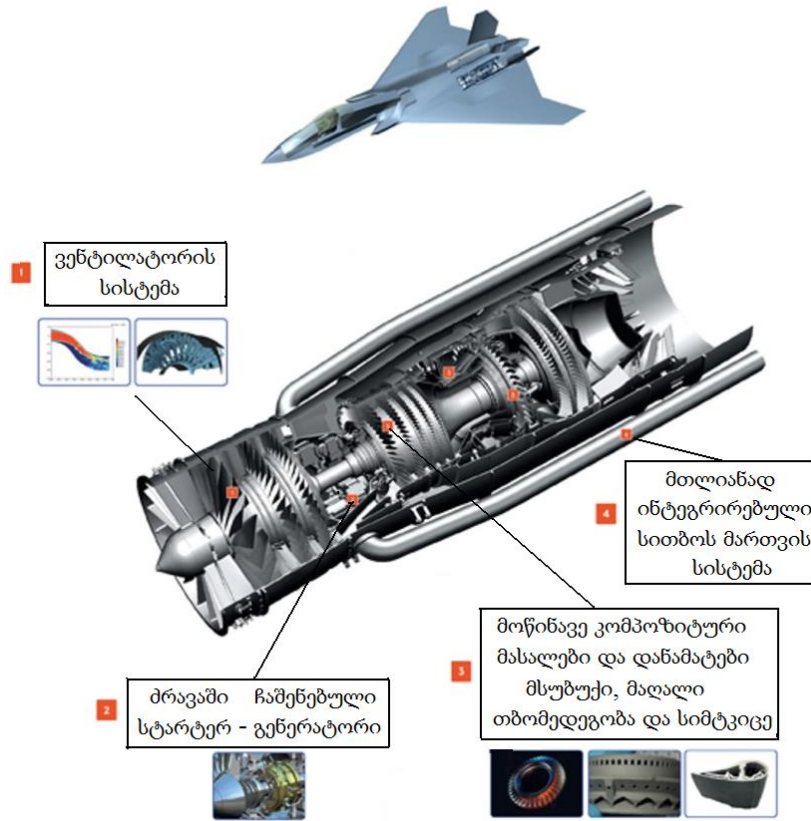
ერთ-ერთ პერსპექტიულ მიმართულებას რომელიც პასუხობს ზემოთ ჩამოთვლილ მოთხოვნებს წარმოადგენს „მთლიანად ელექტროფიცირებული თვითმფრინავის“ კონცეფციის რეალიზაცია.

მოცემული კონცეფციის განხორციელება საშუალებას იძლევა გამოვრიცხოთ: თვითმფრინავის ცენტრალიზებული ჰიდროსისტემა და პნევმოსისტემა რომლისთვისაც ჰაერის ართმევა ხდება უშალოდ ძრავადან, აგრეთვე კბილანური გადაცემები თვითმფრინავისა და ძრავას აგრეგატების აძვისათვის. ამ დროს საგრძნობლად იცვლება ძალური დანადგარის აგრეგატებისა და კვანძების ფუნქციები და შეთანწყობა. ძრავას აღარ

ექნება აგრეგატების აძვრის კოლოფი ძველი სახით. სტარტერ- გენერატორი გარე განლაგების ნაცვლად ჩადგმული იქნება ძრავას შიგნით მაღალი წნევის კომპრესორის კასკადში. დამხმარე ძალური დანადგარი გამოყენებული იქნება ელექტრო ენერჯის გენერირებისათვის. ამრიგად „მთლიანად ელექტროფიცირებული თვითმფრინავის“ ელექტროფიკაციის დონის ამაღლებას თან ახლავს როგორც ელექტროენერჯის წყაროების ასევე ელექტრო მომარაგების სისტემების სიმძლავრეების გაზრდა. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ მიმართულებით უკვე გადადგმულია სერიოზული ნაბიჯები რასაც ადასტურებს საჰაერო ხომალდ Boeing-ის სხვადასხვა თაობებში და მოდიფიკაციებში ელექტრო კვების მომხმარებლებისათვის გაზრდილი სიმძლავრეები.

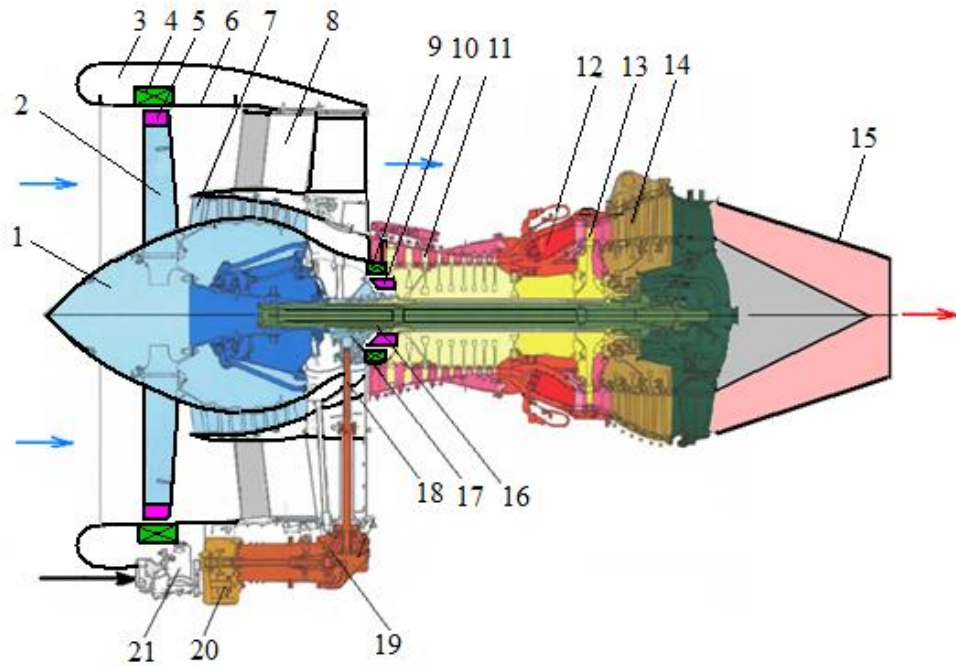
საინტერესოა ასევე ინფორმაცია იმის შესახებ, რომ ბრიტანული ძრავათმშენებელი კომპანია Rolls-Royce ამუშავებს მეექვსე თაობის ტურბორეაქტიულ ძრავას რომლითაც აღიჭურვება TEAM TEMPEST-ის ავიაგამანადგურებლები და რომელთა წარმოებაში ჩაშვება გათვალისწინებულია 2035 წლიდან. მოცემულ ძრავაში მაღალი საფრენოსნო-ტექნიკური მონაცემების მისაღწევად გამოყენებული იქნება თანამედროვე მასალები და ტექნოლოგიები, მნიშვნელოვნად გაიზრდება ძრავას მიერ გამომომუშავებული ელექტრო ენერჯია. ასევე გათვალისწინებულია მთლიანად ინტეგრირებული სითბოს მართვის სისტემის და მაღალი ელექტრო ენერჯის კვების წყაროს ძრავაში ჩაშენებული სტარტერ-გენერატორის გამოყენება (ნახ. 1.1).

ROLLS-ROYCE-ის მომავლის ტურბო-რეაქტიული ძრავა



ნახ. 1.1. Rolls-Royce-ის პერსპექტიული ტურბორეაქტიული ძრავას სქემა

თანამედროვე აირტურბინული ძრავების კონსტრუქციული სქემების ანალიზის საფუძველზე მიზანშეწონილია განხორციელდეს მათ ვენტილატორებში და კომპრესორებში ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების ინტეგრაციის საკითხების დამუშავება (ნახ.1.8.)



ნახ.1.8. ორკონტურიანი ტურბოვენტილატორული ძრავას კონსტრუქციული სქემა ვენტილატორში და მაღალი წნევის კომპრესორში ინტეგრირებული ძრავა-გენერატორული მოწყობილობებით

სადოქტორო ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს საჰაერო ხომალდ Boeing 737-ის ორკონტურიანი ტურბოვენტილატორული ძრავების CFM-56 მაგალითზე მის მბრუნავ კვანძებში (ვენტილატორი, დაბალი წნევის კომპრესორი, მაღალი წნევის კომპრესორი) ინტეგრირებული ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობის პარამეტრების ოპტიმიზაცია მათემატიკური მოდელირების პროგრამირების მეთოდების გამოყენებით რაზედაც მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ელექტრო მოწყობილობის როგორც მასა გაბარიტები ასევე მარგი ქმედების კოეფიციენტი. სასრული ელემენტების მეთოდთან ერთად გეომეტრიული პროგრამირება წარმოადგენს მოხერხებულ ინსტრუმენტს მრავალპარამეტრიანი მოწყობილობების დაპროექტების დროს ისეთების როგორებიც არიან ელექტრო ძრავები და გენერატორები.

მოცემულ სამუშაოში ოპტიმალური პროექტირების მიზნით მიზანშეწონილია მათემატიკური მოდელირების გეომეტრიული პროგრამირების გამოყენება [1].

გეომეტრიული პროგრამირების მეთოდი კომბინაციაში ექსპერიმენტის დაგეგმასთან იძლევა სასურველ შედეგს მათემატიკური მოდელის მიზნობრივი შემზღუდავის სახით.

მეორე თავში გადმოცემულია საავიაციო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პროექტირების მეთოდიკა.

საავიაციო ელექტროძრავა-გენერატორულ მოწყობილობების პროექტირება გართულებულია იმ ფაქტორით, რომ ერთი და იგივე მოწყობილობამ უნდა შეასრულოს აბსოლუტურად განსხვავებული ამოცანა, იმუშაოს სხვადასხვა რეჟიმებში, კერძოდ გენერატორული რეჟიმის შემთხვევაში იფუნქციონიროს ხანგრძლივ დამყარებულ რეჟიმში, ხოლო ძრავული რეჟიმის დროს – გარდამავალ რეჟიმში. ორივე შემთხვევაში გეომეტრიული ზომები და სტატიკური ხასიათის პარამეტრები დარჩება საერთო, ხოლო ელექტრომაგნიტური დატვირთვები, დინამიკური ხასიათის პარამეტრები იქნება საგრძნობლად განსხვავებული, ერთმანეთისაგან. თვისობრივად განსხვავებული იქნება აგრეთვე ძრავულ და გენერატორულ რეჟიმში მომუშავე მოწყობილობის გამოსავალი პარამეტრები.

პროექტირება შედგება რამდენიმე ეტაპისაგან და ქვეეტაპისაგან.

პირველ ეტაპზე შერჩეულია პროექტირების მეთოდები. არსებული გეომეტრიული და პარამეტრული მეთოდებიდან შერჩეულია პროექტირების გეომეტრიული მეთოდი.

პროექტირების მეორე ეტაპი მოიცავს მათემატიკური მოდელის შექმნას პოლინომების ან პოზინომების სახით.

მესამე ეტაპზე ხდება ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტა, კერძოდ, უამრავი ვარიანტებიდან ოპტიმალური ვარიანტის შერჩევა, რომელიც დააკმაყოფილებს ძრავა-გენერატორის მიმართ წაყენებულ ყოველგვარ მოთხოვნებს.

იმისათვის, რომ გენერატორულ რეჟიმში ხანგრძლივად მომუშავე ძრავა-გენერატორი გარდავქმნათ განმეორებით ხანმოკლე რეჟიმში მომუშავე ძრავად, გამოყენებულია მუშა გრაგნილების პარალელური შეერთების ხერხი. ამ შემთხვევაში ძრავა-გენერატორის ძირითადი პარამეტრები, როგორცაა უძრავი და მოძრავი ნაწილების აქტიური და რეაქტიული წინააღმდეგობები, საგრძნობლად მცირდება, რაც თავის მხრივ იწვევს სიმძლავრის, გამშვი, მაქსიმალური და ნომინალური მომენტების

ზრდას. ძრავა-გენერატორის გენერატორული რეჟიმის ანგარიშის სტრუქტურული სქემა მოცემულია ნახ. 2.1. – ზე.

რაც შეეხება ელექტრომაგნიტურ პარამეტრებს, როგორცაა ხაზოვანი დატვირთვა, დენის სიმკვრივე, მაგნიტური ინდუქცია მაგნიტოგამტარის სხვადასხვა უბანზე, პროექტირების ცვლადი კოეფიციენტები და ა. შ. საანგარიშოა და ახლიდან შესარჩევია. ძრავა-გენერატორის ძრავას რეჟიმის ანგარიშის სტრუქტურული სქემა მოცემულია ნახ. 2.2. – ზე.

ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური პროექტირების შემავალი სიდიდეების ნუსხა. იგი შეიძლება დავყოთ რამოდენიმე ქვეჯგუფებად, ესენია:

ა) მუდმივი პარამეტრები, რომლებიც დაპროექტირების პროცესის დროს არ იცვლიან აბსოლუტურ სიდიდეს,

ბ) ცვლადი შემავალი სიდიდეები, რომლებიც პროექტირების პროცესის დროს იცვლიან თავიანთ მნიშვნელობებს გარკვეულ ზღვრებში, განსაზღვრული ბიჯით.

გ) ცვლადი, ან მუდმივი კოეფიციენტები შესაბამისი ცვლილების ფარგლებით და ინტერვალით.

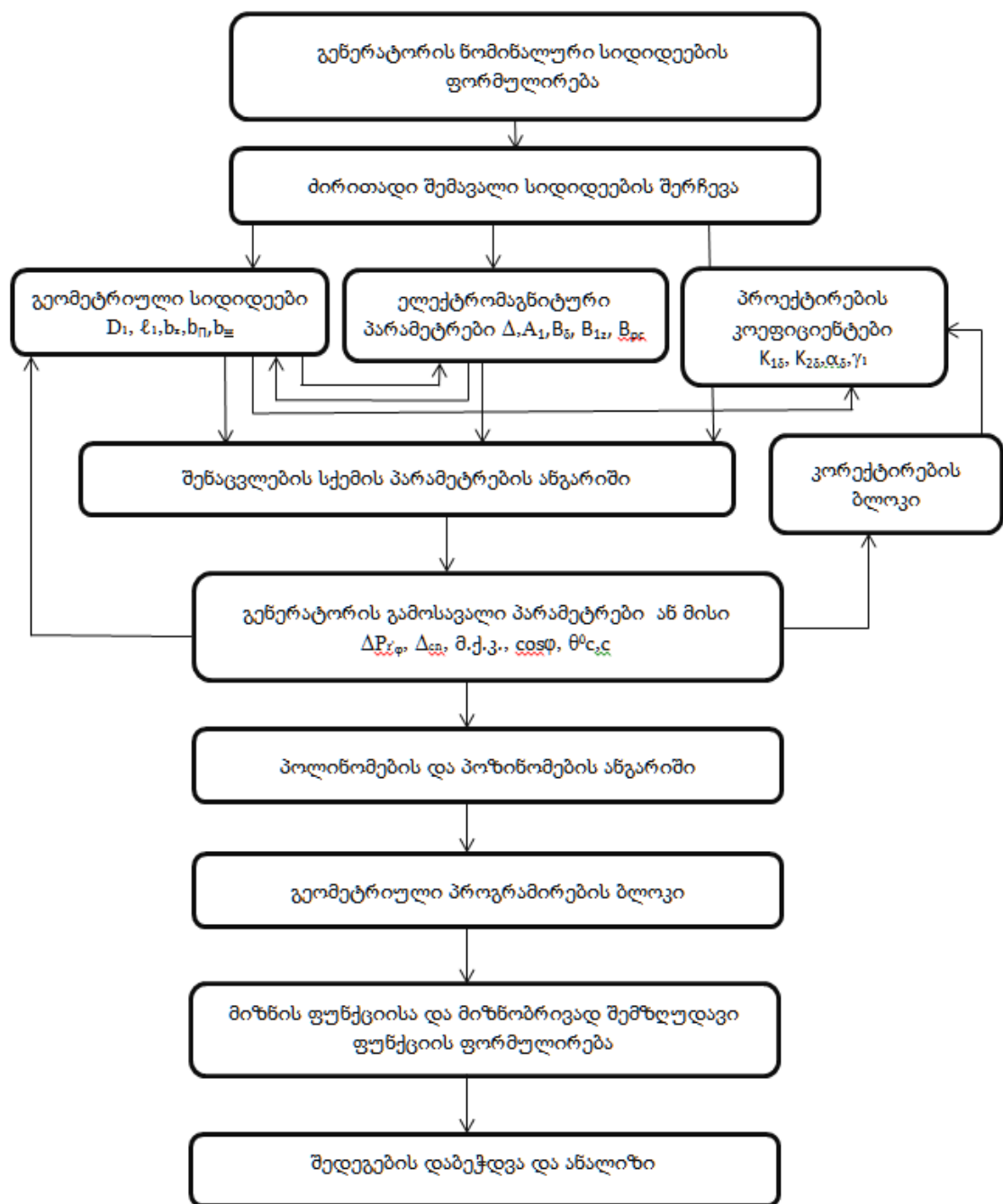
დ) მაგნიტოგამტარის გეომეტრიული ფიგურის ფორმები. კერძოდ კბილის და ღრმულის გეომეტრიული ზომები და ფორმა.

ე) მაგნიტის მაგნიტური მასალა, ფორმები და მაგნიტოგამტარის კომბინაციური სურათი.

ვ) საიზოლაციო მასალის იზოლაციის კლასი.

ზ) მაგნიტოგამტარის მარკა და ა. შ.

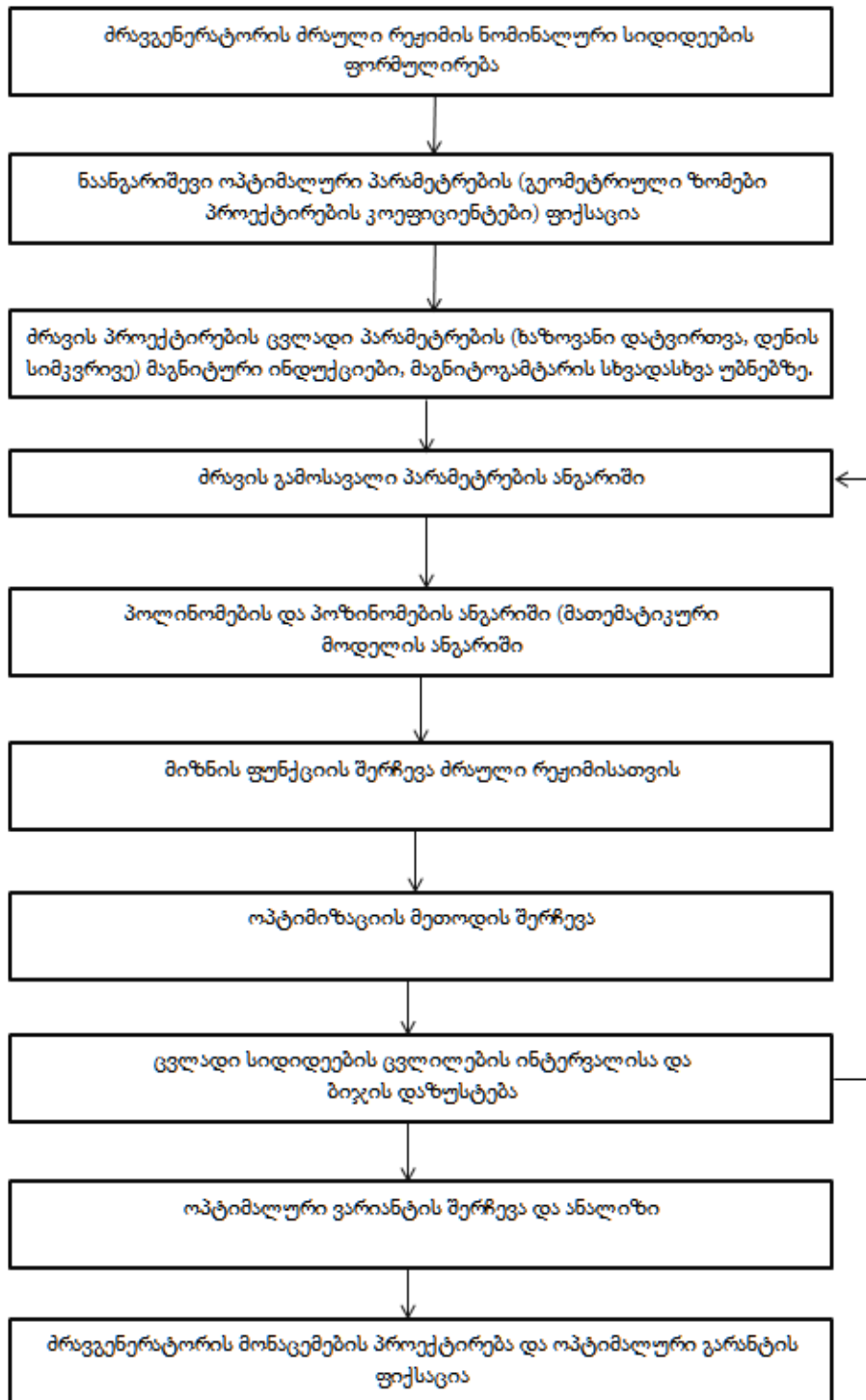
თ) ელექტრომაგნიტური დატვირთვები და ინდუქციები უბანზე.



ნახ. 2.1. ძრავა-გენერატორის გენერატორული რეჟიმის ანგარიშის სტრუქტურული სქემა

ოპტიმალური ვარიანტის პოვნის გამარტივების მიზნით საჭიროა წინასწარ შეირჩეს ისეთი გამომავალი და შემავალი პარამეტრების სიდიდეები, რომ ოპტიმალური ვარიანტი მდებარეობდეს ან საზღვრებს შიგნით, ან საზღვარზე. მეორე ხერხი ანგარიშის გამარტივებისა მდგომარეობს შემდეგში, პირველ ეტაპზე რომელიმე შემავალი

პარამეტრის ცვლილების ბიჯი შეირჩევა ამავე პარამეტრის ცვლილების ზღვრების 20% სიდიდის. ეს გარემოება საგრძნობლად ამცირებს საანგარიშო ვარიანტების რაოდენობას, ხოლო მეორე ეტაპზე შემაჯავლი პარამეტრების ბიჯის



ნახ.2. 2 ძრავა-გენერატორის ძრავის რეჟიმის ანგარიშის სტრუქტურული სქემა

ცვლილების სიდიდე დაიყვანება ინტერვალის სიდიდის 2% – მდე. რაც საგრძნობლად ამარტივებს ოპტიმალური ვარიანტის პოვნის სტრუქტურას. ცხრ. 2.1 მოცემულია თვალსაჩინოების მიზნით ზემოთაღწერილი ხერხის დემონსტრაცია.

2.2. მუდმივი მაგნიტების შედარებითი ანალიზი

საავიაციო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პროექტირების დროს გათვალისწინებული უნდა იქნეს მათი ტექნიკური - ეკონომიური და საექსპლუატაციო მოთხოვნები და ამის მიხედვით მოხდეს მათთვის მუდმივი მაგნიტების ტიპების შერჩევა. ქვემოთ წარმოდგენილია მუდმივი მაგნიტების ძირითადი მახასიათებლები და მათი დამზადების ტექნოლოგიები:

იშვიათ მიწათა ელემენტების შემცველი მუდმივი მაგნიტების საუკეთესო მაგნიტური თვისებების გამო, მიუხედავად მათი სიმძვირისა, ისინი მიეკუთვნებიან სტრატეგიულ პროდუქციას და მათი გამოყენების სფერო მატად დიდია. დღემდე მუდმივი მაგნიტების ენერგეტიკულ გამოყენებებში (ელექტროძრავები, ქარის ტურბინები, ელექტრული მანქანები) და მაგნიტოელექტრონიკაში [20] დომინირებდნენ იშვიათ მიწათა (RE) ფერომაგნიტური მასალები (Nd-Fe-B, Sm-Co). მუდმივი მაგნიტების ხარისხი ფასდება მათი ენერგეტიკული სიმკვრივის $(BH)_{max}$ მაღალი მაჩვენებელით, რომელიც მოითხოვს როგორც მაღალ დამაგნიტებას, ასევე მაღალ კოერციულობას. დღეისთვის დიდი ძალისხმევა ფოკუსირდება იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველ მუდმივ მაგნიტებზე, RE ელემენტებთან დაკავშირებულ სხვადასხვა პრობლემების გამო, მათ შორის საერთაშორისო ბაზარზე RE ელემენტების მოწოდების გამარტივების აუცილებლობასთან [21]. ასევე [20, 21] შრომებში ასახულია მუდმივი მაგნიტების დამზადების მეთოდები მაგნიტური ნანომავთულების ბაზაზე, რომლებიც ორიენტირებულია ეპოქსიდურ ან პოლიმერულ მატრიცებში არსებულ მაგნიტურ ველში.

მესამე თავში გადმოცემულია გეომეტრიული პროგრამირების მეთოდის ზოგადი მიმოხილვა. არსებობს ელექტრო მანქანების ოპტიმიზაციის მრავალი მეთოდი. თითოეულ მეთოდს საფუძვლად უდევს ესა თუ ის მათემატიკური მოდელი რომლებიც აკავშირებენ ელექტრული მანქანის შემავალ და გამომავალ მაჩვენებლებს. მრავალი მეთოდის საფუძველს წარმოადგენს პროექტირების განტოლებები, რომლებიც მიღებულია როგორც ანალიზურად ასევე ცდების გზით. ელექტრული მანქანების პროექტირების დროს მათემატიკურ მოდელებად შეიძლება გამოყენებული იქნეს დიფერენციალური განტოლებები, რაც საშუალებას იძლევა გათვალისწინებული იქნეს როგორც სტატიკური ასევე დინამიკური მახასიათებლები. როგორც წესი ამოცანებს დაკავშირებულს ელექტრული მანქანების ოპტიმიზაციასთან გააჩნიათ რამდენაიმე ამოხსნა და ოპტიმიზაციის მიზანს შეადგენს საუკეთესო ამოხსნის მოძებნა სხვა მრავალი პოტენციურად შესაძლოდან. ოპტიმიზაცია შეიძლება განხორციელდეს მრავალი მეთოდის საშუალებით, როგორც ძალზე რთული ანალიზური და რიცხვითი ასევე ხელით დათვლის მეთოდის გამოყენებით. ოპტიმიზაციის მეთოდები ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან პროგრამირების სირთულით, ანგარიშის დროით და კრებადობის სიჩქარით. ელექტრული მანქანის დაპროექტების დროს შეზღუდვები დაკავშირებულია გრაგნილების გადახურებასთან, ღირებულებასთან, გაბარიტებთან და ა.შ. ყველაზე მეტად გავრცელებულია შეზღუდვების აღრიცხვების შემდეგი მეთოდები:

1. **ცვლადების ზღვრული მნიშვნელობების ფიქსაცია** – მოხერხებულია გამოსაყენებლად გრადიენტული მეთოდებისა და კორდინატული ძიების დროს როდესაც შეზღუდვები დადებულია დამოუკიდებელ ცვლადებზე.

2. **საჯარიმო ფუნქციების მეთოდი** – მხედველობაში ღებულობს უტოლობების ტიპის შეზღუდვებს და დაფუძნებულია ახალ ფუნქციაზე

$$J(x, u, t) = F(x, u, t) = III(x, u, t), \quad (3.1)$$

სადაც $F(x, u, t)$ – გამოსაკვლევი მიზნობრივი ფუნქციაა; $J(x, u, t)$ – ახლად შექმნილი ფუნქციაა; $III(x, u, t)$ – საჯარიმო ფუნქციაა.

საჯარიმო ფუნქციის ნიშანი დამოკიდებულია ამოხსნის მსვლელობაზე: მაქსიმუმის მოძებნის დროს საჯარიმო ფუნქციას აქვს უარყოფითი ნიშანი, ხოლო ფუნქციის მინიმუზაციის დროს ის დადებითია. თითოეული საჯარიმო ფუნქცია საშუალებას იძლევა შეიქმნას რიცხვითი მეთოდი ამოცანის უშუალო ამოხსნისათვის.

3. ლაგრანჟის მამრავლების მეთოდი – საკმაოდ ეფექტურად აღრიცხავს ტოლობების ტიპის პირობების არსებობას. ამ პირობების აღრიცხვა დაფუძნებულია ახალი მიზნობრივი ფუნქციის შექმნაზე, რომელშიც ლაგრანჟის მამრავლების ძებნა შეიძლება განხორციელდეს მათემატიკური პროგრამირების ჩვეულებრივი მეთოდებით.

დღეისათვის ელექტრული გარდამქმნელების ოპტიმიზაციის მეთოდების ძებნა და გაუმჯობესება კვლავ გრძელდება. ამოცანების გარკვეული კლასისათვის მოძებნილი იქნება ოპტიმიზაციის გარკვეული მეთოდები, მაგრამ ამოსახსნელი ამოცანების რიცხვი უფრო სწრაფად იზრდება ვიდრე ოპტიმიზაციის მეთოდების რიცხვი.

ექსპერიმენტის დაგეგმის მეთოდი – საშუალებას იძლევა საგრძნობლად შემცირდეს ექსპერიმენტების რიცხვი და გამოთვლების მოცულობა. ელექტრული მანქანების დაპროექტების დროს ექსპერიმენტის დაგეგმის მეთოდის გამოყენება საშუალებას იძლევა განახორციელოს განზოგადებული ელექტრული მანქანის მათემატიკური მოდელის გარდაქმნა უბრალო პოლინომიურ დამოკიდებულებებში. რაც აკავშირებს მანქანის მუშაობის მაჩვენებლების მის პარამეტრებთან. ექსპერიმენტის დაგეგმის მეთოდი ანხორციელებს ძირითადი და მეორეხარისხოვანი ფაქტორების გამოყოფას, რომლებიც გავლენას ახდენენ ამა თუ იმ მაჩვენებლებზე. ექსპერიმენტის დაგეგმის მეთოდის განვითარება საშუალებას იძლევა მივიღოთ ელექტრული მანქანის უფრო მაღალი ხარისხის მათემატიკური მოდელები და გადავიდეთ გეომეტრიულ პროგრამირებაზე.

გეომეტრიული პროგრამირება – ამ მეთოდის საშუალებით წარმატებით იხსნება მინიმუზაციის ამოცანები რომლებშიც ოპტიმალურობის და შეზღუდვების კრიტერიუმები გამოსახება გარკვეული ტიპის არახაზობრივი ფუნქციებით. გეომეტრიული პროგრამირება ექსპერიმენტის დაგეგმის მეთოდთან ერთად

უზრუნველყოფს ახალი მათემატიკური მოდელების მიღებას ელექტრული მანქანების სინთეზისათვის.

გეომეტრიული პროგრამირება წარმოადგენს ოპტიმიზაციის ამოცანების გადაწყვეტის ერთ-ერთ ხერხს, რომელიც დაფუძნებულია უტოლობის თვისებაზე, კერძოდ საშუალო არითმეტიკული ტოლია ან მეტია საშუალო გეომეტრიულზე. თუ გვაქვს ორი ცვლადი u_1 და u_2 , მაშინ მართებულია გამოსახულება

$$\frac{u_1 + u_2}{2} \geq \sqrt{u_1 u_2} . \quad (3.2)$$

ამ პრინციპზე აგებული გეომეტრიული პროგრამირების მთოდი იძლევა საშუალებას მოვძებნოთ გარკვეული შეზღუდული კლასის მრავალი ცვლადის ფუნქციის ექსტრემალური მნიშვნელობა შემზღუდავი ფუნქციების გათვალისწინებით. გეომეტრიული პროგრამირების სფერო ეხება ე.წ. პოზინომიალური ფუნქციების გამოკვლევას. პოზინომი არის მრავალწევრების ჯამი ან ერთწევრი, შემდეგი ფორმის

$$F = f_1 + f_2 + \dots + f_n , \quad (3.3)$$

$$f_i = C_i X_1^{a_{i1}} X_2^{a_{i2}} \dots X_m^{a_{im}} . \quad (3.4)$$

სადაც C_i - დადებითი მუდმივი სიდიდეა,

X_1, X_2, \dots, X_m - პროექტირების დადებითი ცვლადი პარამეტრებია.

$a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}$ - პროექტირების ცვლადი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლებია.

ძრავა - გენერატორის პროექტირების შემთხვევაში კვლევის საგანს წარმოადგენს ისეთი ფუნქციები, როგორიცაა გამოყენებული ელექტრომაგნიტური მასალების მასების მინიმიზაცია, ელექტრული და მაგნიტური დანაკარგების მინიმალური მაჩვენებლები, მარგი ქმედების კოეფიციენტი, მინიმალური ფასი და ა.შ. ზემოთჩამოთვლილი ფაქტორები შედიან გეომეტრიული პროგრამირების კვლევის სფეროში.

გეომეტრიული პროგრამირება იყენებს თვისობრივად განსხვავებულ (სხვა სიდიდეებისაგან) ეგრეთ წოდებულ ნორმალიზებულ მასებს. ნორმალიზებულ მასები გვიჩვენებენ თუ რა წილი მიუძღვის მოცემულ F ფუნქციაში ამა თუ იმ შესაკრებ $f_1 + f_2 + \dots + f_n$ ფუნქციებს. მაგალითად f_1 ფუნქციას რა წილი უკავია F ფუნქციაში და აღინიშნება δ_1 -

სიდიდით. ანალოგიურად $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ ეგრეთწოდებული ნორმალიზებული მასები გვიჩვენებენ $f_1 + f_2 + \dots + f_n$ ფუნქციების მიერ დაკავებულ წილს ჯამურ ფუნქციაში.

გეომეტრიული პროგრამირების ძირითადი მოთხოვნა - ნორმალიზაციის პირობა შემდეგია:

$$\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n = 1 . \quad (3.5)$$

დადებითი ნორმალიზებული მასების ჯამი უნდა უდრიდეს 1-ს.

$\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ დადებითი ნორმალიზებული მასების შემოტანა იძლევა საშუალებას გამოსაკვლევნი ფუნქცია (F) წარმოვიდგინოთ გეომეტრიული უტოლობის საშუალებით

$$F = f_1 + f_2 + \dots + f_n \geq \left(\frac{f_1}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \left(\frac{f_2}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \dots \dots \left(\frac{f_n}{\delta_n}\right)^{\delta_n} . \quad (3.6)$$

გეომეტრიული პროგრამირების მომდევნო ეტაპზე უნდა შედგეს დადებითი ნორმალიზებული მასების წრფივი განტოლებათა სისტემა, რომელიც უნდა აკმაყოფილებდეს ეგრეთწოდებულ ორთოგონალურობის პირობას.

$$\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n - \delta_{n-1} = 0 . \quad (3.7)$$

სადაც δ_{n-1} არის შემზღუდავი ფუნქციის დადებითი ნორმალიზებული მასა.

ნორმალიზაციისა და ორთოგონალურობის პირობები დადებითი ნორმალიზებული მასების წრფივი განტოლებებია. მრავალი ცვლადის შემთხვევაში ვლდებულობთ ორგანზომილებიან მატრიცას. ორთოგონალურობის პირობა გვიჩვენებს, თუ რა წილი მიუძღვის ამა თუ იმ შემავალ ცვლადს $f_1 + f_2 + \dots + f_n$ ფუნქციის სიდიდეში.

საბოლოო ჯამში F ფუნქციის ოპტიმალური სიღის ძიება დაიყვანება ნორმალიზაციისა და ორთოგონალურობის პირობებით შექმნილი წრფივი განტოლებათა სისტემის გადაწყვეტაში. $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ დადებითი ნორმალიზებული მხები წარმოადგენენ ხარისხის მაჩვენებლებს და შესაბამისად ახდენენ საპროექტო მონაცემების განზოგადობას.

მეოთხე თავში წარმოდგენილია ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავება კომპიუტერული სისტემა Matlab/Simulink-ის საშუალებით. სხვადასხვა ობიექტების კვლევის ერთერთი მნიშვნელოვანი ეტაპია ექსპერიმენტული მონაცემების აპროქსიმაცია რაიმე გლუვი ფუნქციით. ეს ამოცანა დაიყვანება ექსპერიმენტიდან მიღებული მონაცემების საფუძველზე მოდელის პარამეტრების ისეთი მნიშვნელობების შერჩევაზე, როდესაც რეალური და მოდელის გამოსასვლელი სიდიდეები რაიმე კრიტერიუმით საუკეთესოთ უახლოვდებიან ერთმანეთს. მოდელის სახეც და მიახლოების კრიტერიუმიც შეირჩევა კონკრეტული ამოცანიდან გამომდინარე, დამოკიდებულია გამოსაკვლევი ობიექტის ან პროცესის თვისებებზე, ამოცანის მიზანზე და ა.შ.

დავუშვათ, რომ ზოგადად მოცემული y ცვლადი დამოკიდებულია x ცვლადზე რაიმე ფუნქციით: $y = f(x, a, b, c)$, სადაც a, b, c არის პარამეტრები, რომელთა განსაზღვრა არის საჭირო. ძრავა - გენერატორის ოპტიმალური პროექტირების შემთხვევაში y ცვლადი ფუნქციის როლში გამოდის ისეთი მახასიათებლები როგორცაა ელექტრომაგნიტური მასალების მასები, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების დანაკარგები, დენგამტარი მილებისა და მაგნიტოგამტარების გადახურების ტემპერატურები, ძრავა - გენერატორის ძრავული რეჟიმის ნომინალური, მაქსიმალური და გამშვები მომენტები, გენერატორული რეჟიმის გადატვირთვის უნარიანობა, ნაკეთობის ფასი და სხვა.

რაც შეეხება X ცვლად დამოუკიდებელ სიდიდეებს, ისინი თვისობრივად განსხვავებულ პარამეტრებს წარმოადგენენ. ასე მაგალითად ძრავა - გენერატორის გეომეტრიული ზომები, როგორცაა საკბილო და საპოლუსო დანაყოფი, კბილისა და ღრმულის აბსოლუტური ზომები და ფორმა, მაგნიტოგამტარის უღელი, სიგრძე, შიდა დიამეტრი და ა.შ. ბუნებით (თვისობრივად) აბსოლუტურად განსხვავდებიან ელექტრომაგნიტური პარამეტრებისაგან, როგორცაა ხაზოვანი დატვირთვა, დენგამტარი ნაწილების დენის სიმკვრივე, მაგნიტოგამტარის დასაშვები მაგნიტური ინდუქციები ცალკეულ უბნებზე, საჭაერო ღრეჩოს სიდიდე, ფორმა და ა.შ. თუმცა ზემოთ

ჩამოთვლილი დამოუკიდებელი ცვლადი სიდიდეები არანაკლებ ზეგავლენეს ახდენენ ძრავა - გენერატორის პროექტირების დამოსავალი ფუნქციების სიდიდეზე.

ტარდება ექსპერიმენტი, რომელშიც დამოუკიდებელ x ცვლადს ანიჭებენ გარკვეულ მნიშვნელობებს შესაძლო არიდან და აფიქსირებენ დამოკიდებულ y ცვლადის შესაბამის მნიშვნელობებს. ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური პროექტირების პროგრამა ითვალისწინებს ექსპერიმენტის ჩატარების ფართო სპექტრს, კერძოდ შეიძლება ვცვალოთ შემავალი პარამეტრების რაოდენობა, მათი ცვლილების ინტერვალი, ცვლილების ბიჯი. ექსპერიმენტი ჩატარებულია [Адлер, „Планирование эксперимента“] ლიტერატურის მიხედვით. ოპტიმალური პროექტირების დროს გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება ექსპერიმენტის დაგეგმის თეორიულ ნაწილს. ექსპერიმენტის დაგეგმა მოიცავს ეგრეთწოდებულ ბაზისურ სიდიდეების სწორ მიკვლევას და შერჩევას. ბაზისური სიდიდეებიდან ცვლილების ინტერვალების მიზანშეწონილ აბსოლუტური სიდიდეების დადგენას, ცვლადი სიდიდეების ცვლილების ბიჯის შერჩევას და სხვა. ყველა ზემოთჩამოთვლილი სიდიდეები ატარებენ ერთიმეორისაგან განსხვავებულ, სპეციფიკურ ხასიათს. ამიტომ მათ შერჩევაზეა დამოკიდებული ექსპერიმენტის დადებითი ან უარყოფითი შედეგი. თუ რომელიმე მათგანი არასწორედ იქნება შერჩეული, ცვლადი ფუნქცია განიცდის წყვეტას და პასუხი ცალსახად იქნება განუსაზღვრელი და უარყოფითი. ასე, მაგალითად თუ არასწორედ შევირჩევთ მაგნიტოგამტარის კბილის სიგანის ბაზურ სიდიდეს, ან ცვლილების ინტერვალს, დადგება მაგნიტოგამტარის გაჟღენთვის მომენტი და აუცილებელი დამამაგნიტებელი ძალის (ამპერხვევების) სიდიდე გადინაცვლებს განუსაზღვრელობაში (უსასრულოდ გაიზრდება). ექსპერიმენტის შედეგად მიიღება ამ ცვლადების მნიშვნელობების წყვილების სიმრავლე: (x_i, y_i) , სადაც $i = 1, \dots, N$, ხოლო N არის ექსპერიმენტების რაოდენობა. მიღებული ინფორმაციიდან ხდება a, b, c კოეფიციენტის მნიშვნელობების ძიება, ისე, რომ უზრუნველყოფილი იყოს მონაცემების f -ფუნქციით აღწერის სასურველი სიზუსტე. ყველაზე ხშირად გამოიყენება აღწერის ერთერთი საუკეთესო საშუალება - უმცირესი კვადრატების მეთოდი. მნიშვნელოვანია აგრეთვე, ამ ამოცანის გადასაწყვეტად საუკეთესო პროგრამული უზრუნველყოფის შერჩევა, რომელიც

მოგვცემს საშუალებას გადაწყდეს აპროქსიმაციის ამოცანა საუკეთესო სიზუსტით, მოკლე დროის და ნაკლები შრომის დანახარჯებით. ნაშრომში გამოყენებულია მსოფლიოში ფართოდ გავრცელებული კომპიუტერული მოდელირების პროგრამული სისტემა Matlab/Somulink-ი.

4.2. უმცირესი კვადრატების მეთოდის გამოყენება ერთგანზომილებიანი და მრავალგანზომილებიანი რეგრესიული ანალიზის დროს

რეგრესიული ანალიზი შეისწავლის ერთი ან რამოდენიმე დამოუკიდებელი x_i ცვლადების გავლენას დამოკიდებულ y ცვლადზე. ფუნქციური კავშირი დამოკიდებულ და დამოუკიდებელ ცვლადებს შორის შესაძლებელია აღიწეროს გარკვეული განტოლებით, რომელსაც რეგრესიის განტოლება ეწოდება. ყველაზე ხშირად პრაქტიკაში წრფივი რეგრესია გვხვდება ანუ დამოკიდებულება მოცემულია წრფივი ფუნქციით:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b, \quad (4.5)$$

რომელშიც კოეფიციენტები b, a_1, a_2, \dots, a_n მოიძებნება უმცირესი კვადრატების მეთოდის გამოყენებით. მათემატიკური მეთოდი, რომელიც დაფუძნებულია საძიებელი ცვლადების შემცველი გარკვეული ფუნქციების კვადრატების მინიმიზაციაზე. ამ მეთოდს დიდი გამოყენება აქვს რეგრესიულ ანალიზში და ფაქტიურად წარმოადგენს საბაზისო მეთოდს. კერძოდ, წრფივი რეგრესიის განტოლებაში უცნობი კოეფიციენტების შეფასება ხდება უმცირეს კვადრატთა მეთოდით. ვთქვათ, ამხსნელი ცვლადის (პრედიქტორის) და დამოკიდებულებული ცვლადის დაკვირვებულ მნიშვნელობათა წყვილებია:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$$

როგორც უკვე აღწერილია, წრფივი რეგრესიისას ვეძებთ ისეთ $y = ax + b$ წრფეს, რომელშიც X -ის დაკვირვებული მნიშვნელობების შეტანის შემდეგ, Y -ის შესაბამისი მნიშვნელობებიდან გადახრების კვადრატების ჯამი მინიმალურია:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \rightarrow \min \quad (4.6)$$

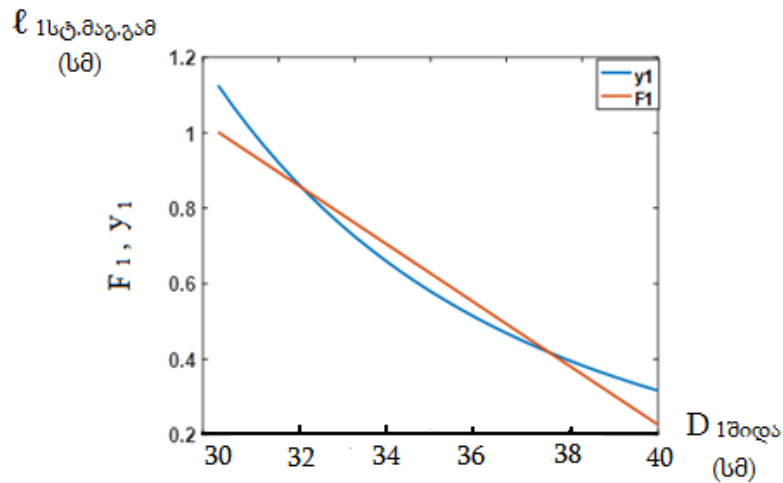
აქ საძიებელი ცვლადებია a და b კოეფიციენტები, რომლებისთვისაც ვიღებთ:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (4.7)$$

ნაშრომში ჩვენი მიზანია მრავალგანზომილებიანი რეგრესიის ანალიზის ჩატარება. უმცირესი კვადრატების მეთოდი გამოიყენება ამ შემთხვევაშიც. გამოთვლების მოცულება იზრდება, ამიტომ საჭიროა კომპიუტერული პროგრამების გამოყენება. მრავალგანზომილებიანი რეგრესიის მოდელი აღიწერება (4.5) გამოსახულებით.

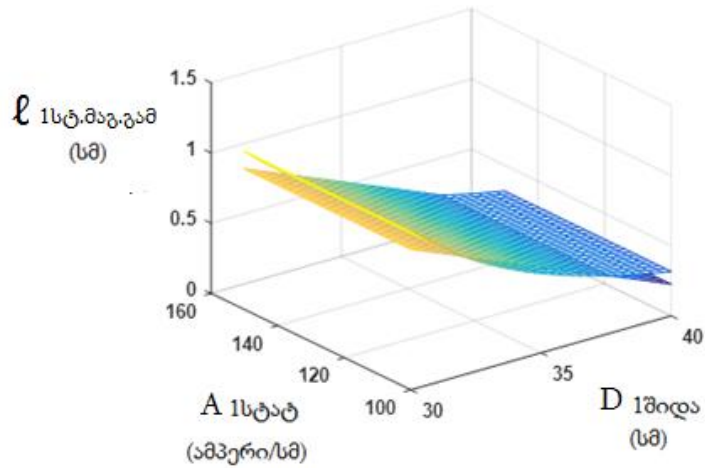
$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b, \quad (4.5)$$

მასში შემავალი უცნობი კოეფიციენტები განისაზღვრება უმცირესი კვადრატების მინიმუმის მეთოდით.

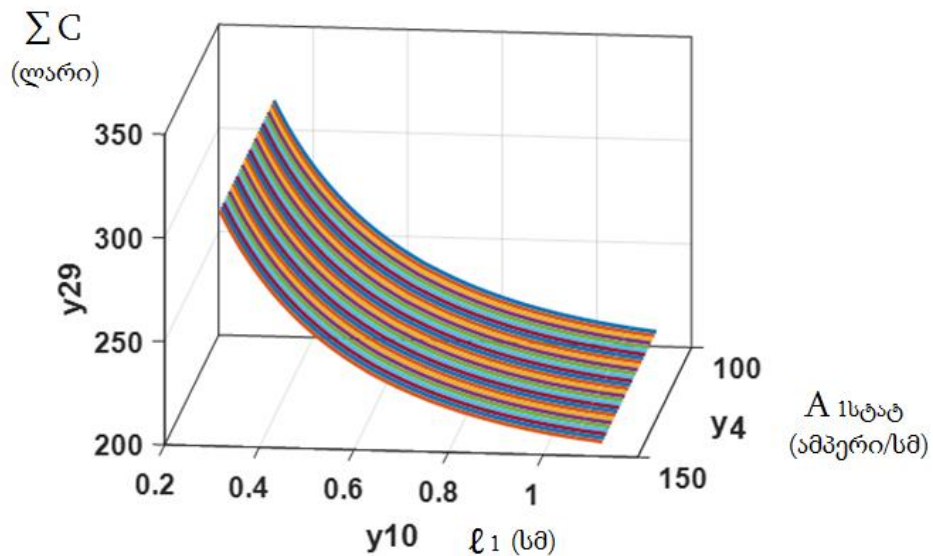


ნახ.4.1. ℓ_1 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

მიღებული მოდელის ზედაპირი სამგანზომილებიან სივრცეში ნაჩვენებია ნახ.4.2-ზე:



ნახ.4.2. l_1 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით სივრცეში



ნახ. 4.46. $\sum c$ (y_{29}) ცვლადის $A_{1\text{სტატ}}$ (y_4) და l_1 (y_{10}) ცვლადებზე დამოკიდებულების გრაფიკი

მეხუთე თავში განხილულია ძრავა-გენერატორის გამოსაკვლევ უნივერსალური სტენდი და მისი გამოცდის შედეგები

ძრავა-გენერატორის გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდი შედგება რამდენიმე ბლოკისაგან ესენია:

1. მუდმივი დენის შერეული აგზნების ძრავა.
2. რეგულირებადი კვების წყარო.

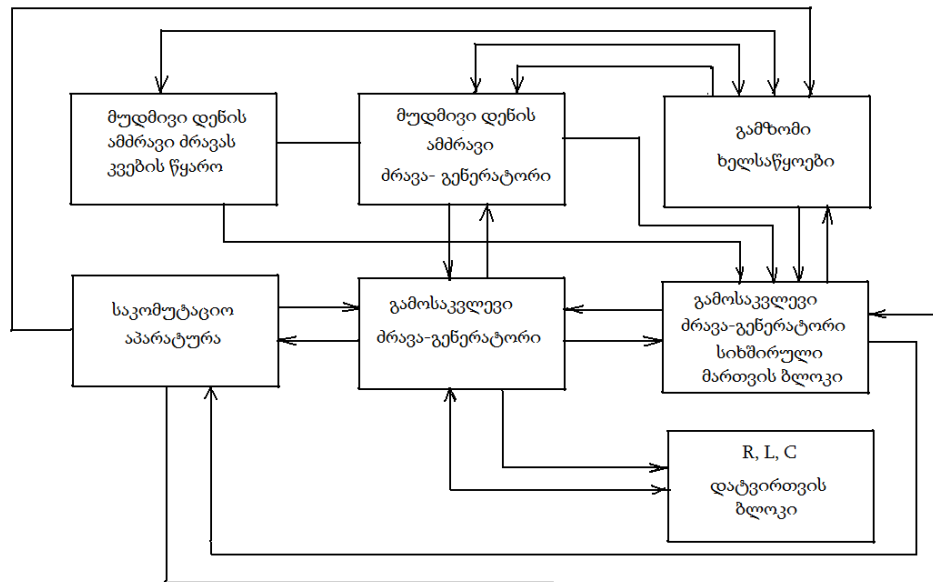
ძრავს შეუძლია იმუშაოს როგორც ძრავულ, ასევე ელექტრომაგნიტური მუხრუჭის რეჟიმში. კერძოდ, დამოუკიდებელი აგზნების რეჟიმში, თუ მუდმივი დენის ძრავას დავტვირთავთ აქტიური წინააღმდეგობით და დავაფიქსირებთ დამუხრუჭებულ მომენტს, მივიღებთ მომენტის საზომ ხელსაწყოს.

როდესაც საჭიროა ძრავა-გენერატორის გამოკვლევა გენერატორულ რეჟიმში, საკომუტაციო ბლოკის საშუალებით ამძრავ მუდმივი დენის ძრავს ვაწვდით კვებას, მოგვყავს ბრუნვის მოძრაობაში და ვაფიქსირებთ ჩვენთვის საჭირო პარამეტრებს.

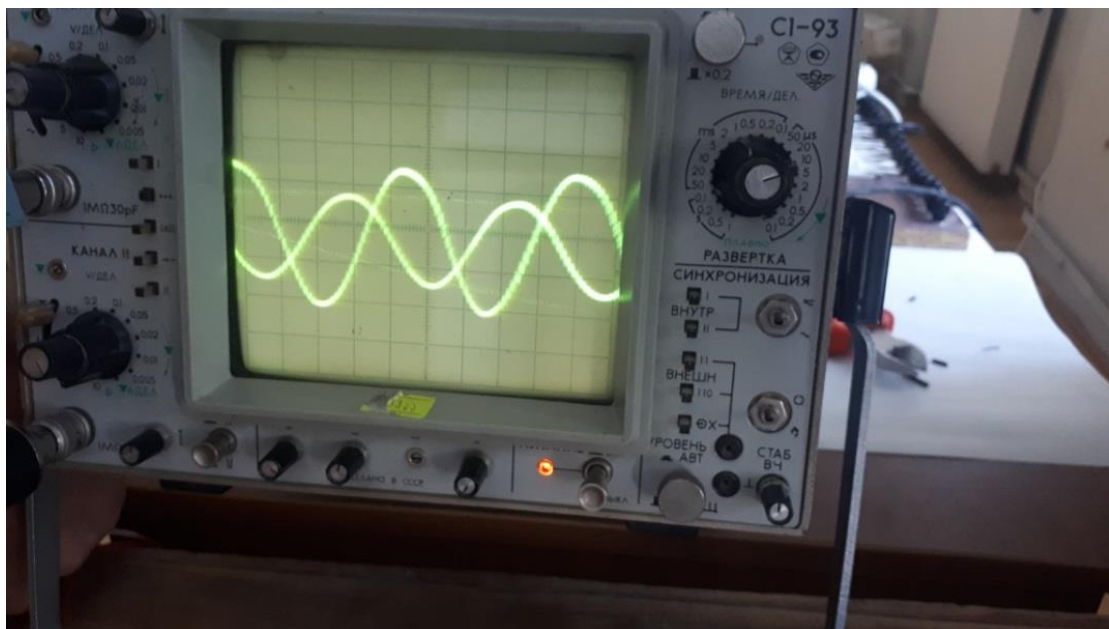
თუ გვჭირდება გამოსაცდელი ძრავგენერატორის გამოკვლევა ძრავულ რეჟიმში, ამისათვის შესაბამისი კვების წყაროს საკომუტაციო ბლოკის საშუალებით ძრავს ვკვებავთ სიხშირული კვების ბლოკით, მუდმივი დენის ძრავი გადაგვყავს გენერატორულ რეჟიმში, ვტვირთავთ შესაბამისი აქტიური დატვირვით და ვაფიქსირებთ ჩვენთვის საინტერესო პარამეტრებს.

1. მუდმივი დენის კვების წყაროს ბლოკი. მისი დანიშნულებაა მუდმივი დენის ამძრავი ძრავის აგზნების და ლუზის წრედის კვება გამართული ძაბვით. ძაბვის სიდიდის რეგულირება ხდება ძაბვის ლაბორატორიული ავტოტრანსფორმატორების და გამმართველების საშუალებით.
2. ცვლადი დენის, ცვლადი სიხშირის ინვესტორული ბლოკი, რომელიც გამოიყენება გამოსაცდელი ძრავგენერატორის კვების წყაროსათვის ძირეულ რეჟიმში და უზრუნველყოფს სიხშირისა და ძაბვის თანაფარდობის მუშმივობას.
3. დატვირთვის წინააღმდეგობების ბლოკი შედგება სამი სხვადასხვა ტიპის, აქტიური, ინდუქციური და ტევადური წინააღმდეგობების წყობილისაგან, რომელთა საშუალებითაც შესაძლებელია გამოსაცდელი გენერატორი დავტვირთოთ ერთფაზა, ორფაზა, სამფაზა თუფვა აქტიური, ინდუქციური ტევადური ტვირთით ან შერეული RL, RC, RLC, Le ხასიათის დატვირთვით და გამოვიკვლიოთ შესაბამისი პროცესები.
4. გამზომი ხელსაწყოების ბლოკი, ესენია სტაციონარულად ჩართული ან გადასატანი ტიპის ხელსაწყოები, რომლებიც მუდმივად ან ლოკალურად აფიქსირებენ როგორც ამძრავი მექანიზმის, ასევე გამოსაცდელი ძრავგენერატორის გამოსავალ პარამეტრებს. გამზომი ხელსაწყოების ჩამონათვალი მოცემულია დანართ II – ში.

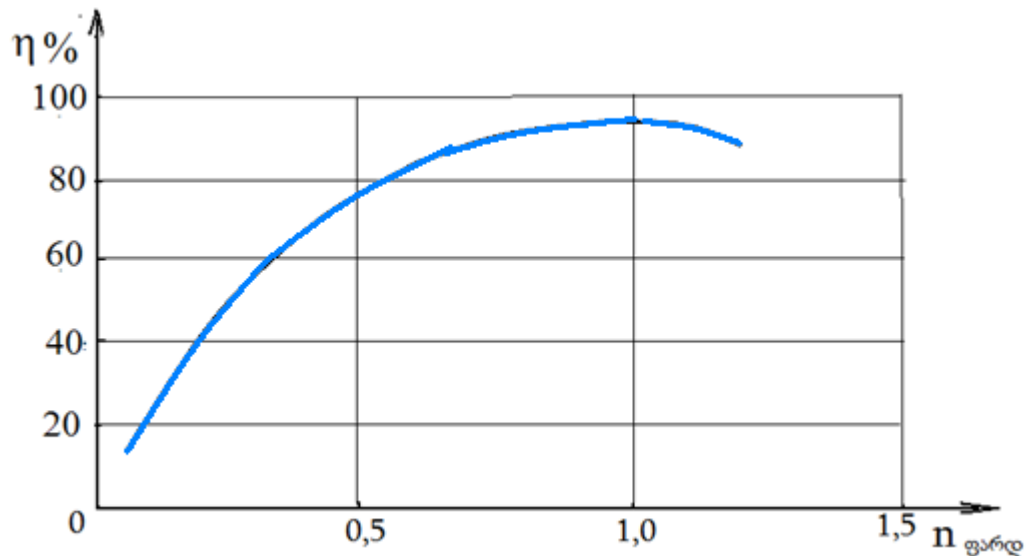
5. საკომუტაციო ბლოკის დანიშნულებაა გადავიყვანოთ ამპრაგი მექანიზმი ძრავული რეჟიმიდან გენერატორულ რეჟიმში და შესაბამისად გამოსაცდელი ძრავგენერატორი გადავიყვანოთ გენერატორულ რეჟიმიდან ძრავულ რეჟიმში.



ახ. 5.0. ძრავა-გენერატორის გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდის ბლოკური სქემა



ნახ. 5.9. ცვლადი დენის სამფაზა გენერატორის გამოსავალი ძაბვისა და დატვირთვის დენის მყისა მნიშვნელობის მრუდები შერეული დატვირთვის შემთხვევაში



ნახ.5.10. გენერატორის მქვ აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში

ძირითადი დასკვნები

სადისერტაციო ნაშრომის „საავიაციო აირტურბინული ძრავებისათვის ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პარამეტრების ოპტიმიზაცია“ ძირითადი მიზანია საჰაერო ხომალდების აირტურბინულ ძრავებში გამოყენებული ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობების ალტერნატიული ვარიანტის დაპროექტება და დამზადება რომელიც გამორჩეული იქნება გაუმჯობესებული მახასიათებლებით, კერძოდ მაღალი საიმედოობით, მცირე მასა-გაბარიტებით, ნაკლები თვითღირებულებით და სხვა. აქედან გამომდინარე შესრულებული სამუშაოს მიხედვით შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი ძირითადი დასკვნები:

- საავიაციო აირტურბინული ძრავების ტექნიკურ და საექსპლუატაციო მახასიათებლების შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით მიზანშეწონილია განხორციელდეს გაშვების სისტემის და გენერატორული მოწყობილობების ინტეგრირება ძრავების ვენტილატორის და კომპრესორების კვანძებში (როტორებში და მათ შესაბამის კორპუსებში) რითაც

უზრუნველყოფილი იქნება საჭირო ენერგეტიკული სიმძლავრეების რეალიზაცია მექანიკური დანაკარგების გარეშე;

- საავიაციო მოწყობილობების ოპტიმალური პროექტირების ერთ-ერთ ძირითად მოთხოვნას წარმოადგენს მასა - გაბარიტების მიმომიზაცია. ძრავა-გენერატორის მასა-გაბარიტების ჯამურ მაჩვენებლებში ელექტროტექნიკურ მასალებს როგორცაა დენგამტარი და მაგნიტოგამტარის სისტემები მნიშვნელოვანი წილი უკავია. შესაბამისად სადოქტორო ნაშრომში დიდი ყურადღება აქვს დათმობილი ოპტიმალური პროექტირების საკითხებს, რომლებიც ეხება ძრავა-გენერატორის შექმნას მინიმალური ელექტროტექნიკური მასალების დანახარჯებით;

- ძრავა-გენერატორული მოწყობილობის მასა შეიძლება წარმოვადგინოთ პოზინომიალური ფუნქციების ჯამით. ასეთი ფუნქციის ექსტრემალური სიდიდეების ძიება ყველაზე მოსახერხებელია გეომეტრიული პროგრამირების საშუალებით. გეომეტრიული პროგრამირების მეთოდი საშუალებას იძლევა ძრავა-გენერატორის დამახასიათებელი გამოსავალი ფუნქციები გამოვსახოთ ცვლადი სიდიდეების ნამრავლისა და გეომეტრიული პროგრამირების ხარისხის მაჩვენებლების საშუალებით;

- ხარისხის მაჩვენებლების მიერ დაგროვებული ინფორმაცია შეიძლება გავავრცელოთ სხვადასხვა სიმძლავრის მსგავსი კონსტრუქციის ძრავა-გენერატორულ მოწყობილობებზე. გარდა ამისა პროექტირების წინასწარ ეტაპზე შესაბამისი ხარისხის მაჩვენებლების გამოყენება საგრძნობლად აიოლებს ოპტიმალური ვარიანტის მოძებნის პროცესს, ამცირებს ძიების ინტერვალს და იძლევა შემავალი პარამეტრების წინასწარი ფიქსაციის საშუალებას;

- გეომეტრიული პროგრამირების, ექსპერიმენტის დაგეგმვისა და რეგრესიული ანალიზის საშუალებით შექმნილია ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური ვარიანტის ძიების მეთოდიკა;

- დასაპროექტებელი ობიექტის წარმოდგენა მატრიცული ფორმით ახალი მრავალფუნქციური ხასიათის დამოკიდებულებით აიოლებს და აფართოებს ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური პროექტირების შესაძლებლობას;

- იმასთან დაკავშირებით, რომ როგორც მუდმივი დენის ასევე ცვლადი დენის

ძრავა-გენერატორულ მოწყობილობების მაღალი საექსპლუატაციო მახასიათებლების მისაღებად მნიშვნელოვანი როლი აკისრიათ მუდმივ მაგნიტებს ამიტომ მოცემულ სადოქტორო ნაშრომში დიდი ყურადღება აქვს დათმობილი არსებული მუდმივი მაგნიტების შედარებით ანალიზს როლებიც დამზადებული არიან როგორც იშვიათ მიწათა (ნეოდიუმ-რკინა-ბორი Nd-Fe-B, სამარიუმ-კობალტის SmCo) ასევე იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველ ელემენტებისაგან კერძოდ, კობალტის ნანომავთულების ბაზაზე შემუშავებული ახალი ტექნოლოგიებით (ქიმიური დალექვის მეთოდი და დარტმითი ტალღით ცხლად დაწნეხვის მეთოდი);

უნივერსალურ სტენდზე ექსპერიმენტალური ძრავა-გენერატორის გამოცდების შედეგად აგებული იქნა შემდეგი მახასიათებლები:

- ელექტრო მამოძრავებელი ძალის E , დატვირთვის დენის I და მარგი ქმედების კოეფიციენტის η დამოკიდებულება ბრუნვათა სიხშირეზე n ;
- მოხსნილი იქნა დატვირთვის დენისა I და გამოსავალი ძაბვის U მყისა მნიშვნელობები სინუსოიდალური მრუდების სახით;
- მოხსნილი იქნა გადახურების ტემპერატურული მონაცემები ძრავა-გენერატორის სხვადასხვა ადგილას კერძოდ შუბლურ ნაწილში და ღრმულში.

თეორიულ და ექსპერიმენტალურ მონაცემებს შორის განსხვავება პროექტირების პირველ ეტაპზე არ აღემატება 15-20 % რაც სრულიად დასაშვებია.