

ნინო ლეზანიძე-ასათიანი

ორმაგი ტრანსფორმატორული საზომი ბოგირის
ოპტიმალური პარამეტრების დადგენისა და
მაღალმგრძობიარობის დამოკიდებულების გამოკვლევა

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
ივლისი, 2013

საავტორო უფლება © 2013 ნინო ლეზანიძე-ასათიანი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ლეზანიძე-ასათიანი ნინოს მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: **ორმაგი ტრანსფორმატორული საზომი ბოგირის ოპტიმალური პარამეტრების დადგენისა და მაღალმგრძობიარობის დამოკიდებულების გამოკვლევა** და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: სრული პროფ. თენგიზ მუსელიანი

რეცენზენტი: სრული პროფ. თამაზ კოხრიძე

რეცენზენტი: ასოც.პროფ. ნაზი ერემეიშვილი

ავტორი: ლებანიძე-ასათიანი ნინო

დასახელება: **ორმაგი ტრანსფორმატორული საზომი ბოგირის ოპტიმალური პარამეტრების დადგენისა და მაღალმგრძობიარობის დამოკიდებულების გამოკვლევა.**

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: თარიღი

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2013 წელი

გუბდნი ჩემს პაწაწინა შვილს ანასტასია ასათიანს

რეზიუმე

თანამედროვე წარმოების განვითარება და დახვეწა, ტექნოლოგიური დონის ამაღლება, გამოშვებული პროდუქციის ხარისხი პირდაპირ დაკავშირებულია ტექნოლოგიური პროცესის კონტროლის დახვეწასთან და ტექნოლოგიური პროცესების ავტომატური მართვის სისტემებთან.

ავტომატური მართვის სისტემების ერთ-ერთი ფუნქციაა წარმოების პროცესის ტექნოლოგიური პარამეტრების კონტროლი და გამოშვებული პროდუქციის ხარისხის შეფასება. რამდენად ზუსტად, საიმედოდ და სწრაფად ხორციელდება ეს კონტროლი დამოკიდებულია ტექნოლოგიური პროცესის გადამწოდებასა და საზომ საშუალებებზე.

კონდუქტომეტრია ერთ-ერთი მარტივი, უნივერსალური, დახვეწილი და ამავე დროს კვლევის ზუსტი ელექტროქიმიური მეთოდია ნივთიერების ისეთი ინფორმაციული პარამეტრის კვლევისა და ანალიზის საქმეში, როგორცაა კუთრი ელექტროგამტარობა. მისი საშუალებით ზომავენ ბინარული ხსნარების კონცენტრაციას, საზღვრავენ თერმოდინამიკურ მუდმივებს, ასევე იმ სიდიდეებს, რომლებიც ახასიათებენ ხსნარების შემადგენლობას, დიფუზიის კოეფიციენტს, იონების აბსორბციას ელექტროდ – ელექტროლიტის საზღვარზე, ელექტროლიტების იონურ შემადგენლობას და ა.შ.

კონდუქტომეტრები და კონდუქტომეტრული გადამწოდები ლაბორატორიულ და სამეცნიერო პრაქტიკის გვერდით უფრო და უფრო ფართო გამოყენებას პოულობენ კვების, ფარმაცევტულ, ქიმიურ, მიკრობიოლოგიურ, ენერგეტიკულ, ნავთობგაზისა და მრეწველობის სხვა დარგებში. მათი გამოყენება ძირითადად დაკავშირებულია ხარისხის განსაზღვრასა და კონტროლთან. ტექნოლოგიური პროცესების კინეტიკისა და სტაბილიზაციის კონტროლისათვის გამოიყენება თხევადი ტექნოლოგიური გარემო.

კონდუქტომეტრული მეთოდის ფართოდ გავრცელება შეიძლება აიხსნას მისი მაღალი სიზუსტით, გაზომვის ფართო დიაპაზონით, აპარატურის სიმარტივით, ტექნოლოგიური ნაკადის უწყვეტი კონტროლის შესაძლებლობითა და სხვა ანალოგიურ ტექნიკასთან შედარებით დაბალი ღირებულებით.

კონდუქტომეტრული მეთოდის დახვეწა პირდაპირ დაკავშირებულია წარმოების, ტექნიკისა და ტექნოლოგიების განვითარებასთან. ჩნდება სულ უფრო მეტი წარმოებები, სადაც ხსნარებისა და ელექტროლიტების კუთრი ელექტროგამტარობის კონტროლი არა მარტო სასურველი, არამედ აუცილებელიცაა. ახალი ტექნოლოგიების გამოყენება იძლევა მაღალი მგრძობიარობის ელემენტებისა და უჯრედების ახალი მოდელების შექმნის საშუალებას.

ხსნარებისა და აირის ნაირსახეობის შენადნობების ფიზიკო-ქიმიური თვისებების ანალიზისათვის უნივერსალურ მეთოდს წარმოადგენს უკონტაქტო კონდუქტომეტრია, რომელიც ხასიათდება სიმარტივითა და საიმედოობით.

უკონტაქტო კონდუქტომეტრიის ერთ-ერთ სახეს წარმოადგენენ ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრები, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება ნავთობქიმიურ, ქიმიურ, ფარმაცევტულ, კვებისა და მრეწველობის დარგებში, როგორც ტექნოლოგიური პარამეტრებისა

და გამოშვებული პროდუქციის ხარისხის მაკონტროლირებელი ხელსაწყოები.

მოცემული ხელსაწყოების მოთხოვნილებებზე მეტყველებს ის ფაქტი, რომ ყველა მსხვილ ხელსაწყოთა მშენებლობის ორგანიზაციებს თავის ასორტიმენტში გააჩნიათ ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების მთელი რიგი, რომელთა დახვეწა განვითარება კვლავაც გრძელდება.

კონდუქტომეტრული მეთოდის დახვეწა და განვითარება აქტიურად მიმდინარეობს მთელ რიგ ქვეყნებში და დაკავშირებულია ისეთი ცნობილი მწარმოებლების სახელთან, როგორცაა „Nappa“ (გერმანია), WTW (შვეიცია), სამეცნიერო – საწარმოო გაერთიანება „Alfabasensi“ და სხვა. საქართველოში ახლო წარსულში ამ დარგში წარმატებით მუშაობდნენ სამეცნიერო-საწარმოო გაერთიანებები „ისარი“ და „ანალიზხელსაწყო“, მაგრამ შექმნილი ვითარების გამო ეს საწარმოები ამჟამად ამ საკითხებზე არ მუშაობენ.

კონდუქტომეტრის არსებობის განმავლობაში დაწერილი იქნა მრავალი წიგნი, სტატია და დისერტაცია, მაგრამ მრავალი ამოცანა ჯერ კიდევ აქტუალურია. ესენია: გაზომვის დიაპაზონის გაზრდა, საიმედოობის ამაღლება და შემოწმების გარეშე ექსპლუატაციის ხანგრძლივობის გაზრდა, გადამწოდის გაბარიტების შემცირება, ხელსაწყოს მეტროლოგიური პარამეტრების გაუმჯობესება და სხვა.

ნაშრომის პირველ თავში წარმოდგენილია ლიტერატურული წყაროების ანალიზის შედეგები. განხილულია ელექტროგამტარობის გაზომვის ხერხები. მოყვანილია კონტაქტური და უკონტაქტო კონდუქტომეტრების როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი მხარეები. განსაკუთრებული ყურადღება აქვს დათმობილი კონდუქტომეტრის ძირითად ელემენტს - უჯრედსა და მის ტიპებს. განხილულია კონტაქტური კონდუქტომეტრული ორ, სამ და ოთხელექტროდიანი უჯრედები და უკონტაქტო ტევადობითი და ინდუქციური უჯრედები მათი ეკვივალენტური სქემებითა და მათი თავისებურებებით.

ამავე თავში განხილულია ასევე, კონდუქტომეტრიაში გამოყენებული ძირითადი საზომი სქემები: ბოგური, Z-მეტრული, Q - მეტრული, F –მეტრული, შედარების, კომპენსაციური, პირდაპირი გაზომვის.

ნაშრომის მეორე თავი ეძღვნება უკონტაქტო ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების გამოკვლევასა და დამუშავებას. შემუშავებულია ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების არსებული სქემების სტატიკური მახასიათებლები, შექმნილია ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ძირითადი მზომი სქემების მათემატიკური მოდელები, რომლებიც გამოიყენებენ გაზომვის პირდაპირ და კომპენსაციურ მეთოდს, ჩატარებულია მათი შედარებითი ანალიზი, რომლის შედეგადაც აღმოჩნდა, რომ ზოგიერთ არსებულ მათემატიკურ მოდელებში არ არის გათვალისწინებული ინდუქციურობის, ურთიერთინდუქციურობის, თხევადი ხვიის ტევადობის და სხვა პარამეტრები, რომელთა გარეშე შეუძლებელია შესრულდეს სრული პარამეტრული ოპტიმიზაცია. გარდა ამისა, მრავალგრაფიანი ტრანსფორმატორული სქემებისათვის არ შეიძლება გამოვიყენოთ მათემატიკური სქემები, რომლებიც ორგრაფიანი ტრანსფორმატორებისათვის არის დაწერილი, რადგანაც ამ მოდელზე

გათვლილ ხელსაწყოებს გააჩნიათ მნიშვნელოვანი ცდომილებანი. ყველა, შედარებით გავრცელებული ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების სქემებისათვის.

ამავე თავში უხვად არის წარმოდგენილი როგორც ძაბვის, ასევე დენის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები.

ნაშრომის მესამე თავი ეძღვნება ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების შედარებითი ანალიზის საკითხებს.

სტატიკური მახასიათებლების მიღებული მათემატიკური მოდელების საფუძველზე, გამოვლენილია კონდუქტომეტრული სტრუქტურების რაოდენობრივი და ხარისხობრივი მაჩვენებლები, ისეთები როგორებიცაა: მგრძობიარობა, საშუალოკვადრატული ცდომილება.

განსაზღვრულია ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების მზომი სქემების სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკური მოდელების მგრძობიარობები და ამ სქემების ცდომილებათა მოდელები როგორც ძაბვის, ასევე დენის ინფორმაციულ პარამეტრებად არსებობის დროს ორ, სამ და ოთხგრაგნილიანი ტრანსფორმატორების შემთხვევებში.

ნაშრომის მეოთხე თავში მოყვანილია თხევადხვიანი კონდუქტომეტრების პირველადი გარდამქმნელის (უჯრედის) ოპტიმალური ელექტრული და მაგნიტური პარამეტრების განსაზღვრის საკითხები.

წრფივი ელექტრული წრედების თეორიის საფუძველზე შედგენილი იქნა თხევადხვიანი კონდუქტომეტრის მათემატიკური მოდელი, რომლის მიხედვითაც მიღებული იქნა გამოსავალი სიგნალის გამოსახულება.

გამოსავალი სიგნალის მიღებული ანალიზური გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ საზომი გარდამქმნელის მგრძობიარობა წარმოადგენს რვა დამოუკიდებელი პარამეტრის ფუნქციას: მოდებული ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობის, კვების წყაროს სიხშირის, შემავალი და გამომავალი ტრანსფორმატორების ხვიათა რიცხვების, შემავალი და გამომავალი ტრანსფორმატორების მაგნიტური გამტარობების, შემავალი ტრანსფორმატორისა და საკვლევი სითხის წინაღობის ომური წინაღობებისა.

განსაზღვრულია თითოეულ ამ პარამეტრზე გამოსავალი სიგნალის სიდიდის დამოკიდებულება.

ამავე თავში მოყვანილია თხევადხვიანი კონდუქტომეტრის მგრძობიარობის მაგნიტურ მასალაზე დამოკიდებულების გამოკვლევის შედეგები.

კომპიუტერის გამოყენებით ძაბვის მიხედვით ტრანსფორმატორული საზომი ბოგების მაქსიმალური მგრძობიარობის განსაზღვრისათვის დამუშავებული იქნა ბლოკ-სქემა, რომელიც წარმოდგენილია ამავე თავში. იგი საშუალებას იძლევა დამუშავებული იქნეს პროგრამა კომპიუტერის ნებისმიერ ენაზე.

Abstrakt

Development and improvement of modern manufacture, improvement of technological level as well as the quality of produced goods are directly connected to improvement of technological process control and automatic control system of technological processes.

One of the functions of automatic control system is a control of technological criteria of manufacturing processes and evaluation of produced goods. How accurately, reliably and quickly is this control conducted depends on sensors of technological processes and measuring tools.

Conductometry is one of the easiest, universal, improved and at the same time exact electro chemical method of research in studying and analysis of such informational parameters of substances as specific electrical conductivity. It can measure the concentration of binary solutions, defines a constant thermodynamic as well as that magnitude, which characterizes the composition of the solutions, coefficient of diffusion, adsorption of ions on electrode -electrolyte border, ionic composition of electrolytes and etc.

Conductometers and conductometric sensors side by side to laboratorial scientific research is more and more widely used in supply, pharmaceutical, chemical, microbiological, energetic, petrol, gas and other fields of industry. Their use is mainly connected to definition and control of quality. Liquid technological environment is used for controlling of kinetics and stabilization of technological processes.

Wide spread conductometric method may be explained with its high accuracy, wide range of measurement, simplicity the system, continuous control of technological capability and lower cost compared to other similar technologies.

Improvement of conductometric method is directly connected to development of manufacturing, methods and technology. There are more and more productions, where the control of specific electrical conductivity of

electrolytes and solutions is not only desirable but very necessary. The use of new technologies enables us to create high-sensitivity elements and new models of cell.

Universal method for physical-chemical analysis of solutions and gas variety is contactless conductometry characterized by simplicity and reliability.

One of the kinds of contactless conductometry are transformative conductometers which are widely used in petrochemical, chemical, pharmaceutical, supply and manufacturing fields, as technological parameters and produced goods quality controlling tools.

The fact that all major utilities builder companies have a number of transformative conductometers in their assortment speaks on demand of given equipments.

Development and improvement of conductometric method is actively in progress in number of countries and are connected to such well-known manufacturers name as Nappa (Germany), WTW (Sweden), scientific-production association “Alphabases” and others. In Georgia scientific-manufacturing associations “Isari” and “Analizkhelsatsko” successfully worked in this field in recent years, but these companies are currently working on this issue because of the existing situation.

Many books, articles and theses have been written during the existence of conductometry but there are a lot of actual questions. These are: increase the measurement range, improvement of reliability and increase of the duration of the operation without inspection, decrease of dimensions of sensors, improvement of metrological parameters and etc.

The first chapter of the thesis deals with the results of analysis of literary sources. There are reviewed methods of measurement of contactless conductometers there. The thesis gives both positive and negative sides of contactless and contact conductometers. Special attention is focused on major elements of conductometers – cell and its types. There are discussed contact

conductometric two-three and four-electrode cells and contactless and inductive cells with equivalent schemes and peculiarities.

The same chapter deals with major measuring schemes used in conductometry: Z-metric, Q-metric, F-metric, comparative, compensative, direct measurement.

The second chapter of the thesis deals with research and processing of contactless transformative conductometers. There are designed static features of existing schemes of transformative conductometers, mathematical models of major measuring schemes of transformative conductometers using direct and compensative methods of measurement. There is conducted their comparative analysis there, which have found that some existing mathematical models do not include inductive, mutual inductive, liquid roll capacity and other parameters, without which it is impossible to fulfill complete parametric optimization. In addition, we cannot use mathematical schemes designed for double roll for multiroll transformative schemes, because tolls designed for this model have significant errors. All, for relatively common transformative conductometer schemes.

The same chapter presents schedules of both, voltage and active and reactive components of the electricity depending on electrical conductivity.

The third chapter of the thesis is dedicated to the issues of comparative analysis of transformative conductometers.

Based on mathematical models of static features there is found out quantitative and qualitative indicators of conductometric structures, such as: sensitivity, average square errors.

There is determined sensitivity of mathematical models of static features of transformative conductometers measuring schemes and models of errors of those schemes, at time of voltage and informational parameters of electricity, in case of two, three and four-roll transformers.

The fourth chapter of the thesis presents the issues of determining optimal electric and magnetic parameters of primary transformers (cells) of liquid roll conductometers.

Based on the theory of linear electric circuits there has been designed a mathematical model of liquid roll conductometer, according to which we have received the image of the output signal.

The analytical image of the output signal shows that sensitivity of measuring transformer represents the function of eight independent parameters of the value of the spread voltage, power supply frequency, and number of rolls of input and output transformers, magnetic conductivity of input and output transformers, impedance of input transformers and investigated liquid resistance.

There is defined the dependence of size of the output signal for each such parameter.

The same chapter provides the results of the research of the dependence of sensitivity of liquid roll conductometer on magnetic material.

There has been processed the block-scheme for determining maximal sensitivity of transformative measuring tools according to the voltage by using the computer which is presented in the same chapter. It enables us to process the program by any computer language.

შინაარსი

სატიტულო გვერდი.....	I
ხელმოწერების გვერდი.....	II
სავტორო უფლების გვერდი.....	III
რეზიუმე (ორ ენაზე).....	IV
შინაარსი.....	VII
ცხრილების ნუსხა.....	XI
ნახაზების ნუსხა.....	XV
შესავალი.....	20
ლიტერატურის მიმოხილვა.....	22
თავი 1. ამოცანის დასმა.....	23
1.1. ელექტროგამტარობის გაზომვის ხერხები.....	23
1.2. კონდუქტომეტრული გადამწოდების სახესხვაობები.....	25
1.3. კონტაქტური კონდუქტომეტრული გადამწოდები.....	27
1.3.1. კონტაქტური გადამწოდების თავისებურებები.....	35
1.3.2. კონტაქტური გადამწოდების გამოყენების არეები.....	37
1.4. ტევადური კონდუქტომეტრული გადამწოდები.....	38
1.4.1. ტევადობითი გადამწოდების თავისებურებანი.....	41
1.4.2. ტევადობითი გადამწოდების გამოყენების დარგები.....	44
1.5. ინდუქციური კონდუქტომეტრული გადამწოდები.....	45
1.5.1. ინდუქციური გადამწოდის თავისებურებანი.....	49
1.5.2. ინდუქციური გადამწოდების გამოყენების დარგები.....	50
1.6. კონდუქტომეტრიაში გამოყენებული ძირითადი საზომი სქემების მიმოხილვა.....	51
1.6.1. ბოგური სქემებით გაზომვის მეთოდი.....	51
1.6.2. შედარების მეთოდის გამოყენების სქემები.....	53
1.6.3. სქემები გაზომვის კომპენსაციური ხერხის გამოყენებით.....	54
1.6.4. სქემები უშუალო შეფასების მეთოდის გამოყენებით.....	55
1.6.5. გაზომვის Z,Q,F მეტრული მეთოდები.....	57
შედეგები და განსჯა	
თავი 2. უკონტაქტო ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების გამოკვლევა და დამუშავება.....	58
2.1. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების საზომი სქემების სტატისტიკური ანალიზი.....	59
2.2. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ბაზისური სქემების სტატისტიკური მახასიათებლების აგება.....	64
2.3. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ბაზისური სქემების სტატისტიკური მახასიათებლების მათემატიკური მოდელების გამოთვლა.....	74
2.4. ტრანსფორმატორული საზომი ბოგას ექვივალენტური სქემა მჭიდრო ინდუქციური კავშირით.....	83

თავი 3. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების სქემების შედარებითი ანალიზი.....	89
3.1. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების მზომი სქემების სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკური მოდელების მგრძნობიარობის განსაზღვრა.....	89
3.2. . ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების საბაზო სქემების ცდომილებების მოდელები.....	96
3.3. . ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების პერსპექტიული სქემების შედარებითი ანალიზი, სტრუქტურული და პარამეტრული ოპტიმიზაცია.....	101
თავი 4. თხევადხვითი კონდუქტომეტრების პირველადი გარდამქმნელის (უჯრედის) ოპტიმალური ელექტრული და მაგნიტური პარამეტრების განსაზღვრა.....	106
4.1. ზოგადი ცნობები.....	106
4.2. თხევადხვითი კონდუქტომეტრის მათემატიკური მოდელის დამუშავება ოპტიმალური პარამეტრების განსაზღვრის მიზნით...	111
4.3 თხევადხვითი კონდუქტომეტრის მგრძნობიარობის მაგნიტურ მასალაზე დამოკიდებულების გამოკვლევა.....	115
4.4. თხევადხვითი კონდუქტომეტრის შემავალი ტრანსფორმატორის გულარას ოპტიმალური ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობისა და მასალის განსაზღვრა.....	118
4.5. ძაბვის მიხედვით ტრანსფორმატორული საზომი ბოგების მაქსიმალური მგრძნობიარობის განსაზღვრის მიზნით კომპიუტერული პროგრამის ბლოკ-სქემის დამუშავება.....	120
და ს კ ვ ნ ე ბ ი.....	128
გამოყენებული ლიტერატურა.....	131

ცხრილების ნუსხა

- ცხრილი 1.1 გვ. 32. პოლარიზაციული წინაღობები ელექტროდების სხვადასხვა მასალისათვის.
- ცხრილი 1.2 გვ. 33. პოლარიზაციული იმპედანსის დამოკიდებულება ელექტროდის ზედაპირის მდგომარეობაზე.
- ცხრილი 1.3 გვ. 34. დამოკიდებულება პოლარიზაციულ წინაღობასა და პლატინირების ხარისხს შორის.
- ცხრილი 3.1 გვ.102. საშუალოკვადრატული ცდომილების მნიშვნელოვანი გაზომვის კომპენსაციური სქემებისათვის.

ნახაზების ნუსხა

- ნახ.1.1 26 გვ. კონდუქტომეტრული უჯრედები და მათი ექვივალენტური სქემები.
- ნახ.1.2 27გვ. კონდუქტომეტრული უჯრედების სახეები: ა-ჩაძირული, ბ-გამდინარე-ჩაძირული, გ-გამდინარე.
- ნახ.1.3 29 გვ. კონტაქტური კონდუქტომეტრული უჯრედის სქემები: ა)ორელექტროდიანი,ბ)სამელექტროდიანი, გ)ოთხელექტროდიანი
- ნახ.1.4 30გვ. კონტაქტური კონდუქტომეტრული უჯრედების ჩანაცვლების ექვივალენტური ელექტრული სქემები.
- ნახ.1.5 35გვ. კლ-ც-1 ტიპის კონდუქტომეტრი.
- ნახ.1.6 36გვ. კლ-ც-1 ტიპის კონდუქტომეტრის უჯრედების კომპლექტი: ა- A ტიპის, ბ- B ტიპის, გ- C ტიპის, დ-Dტიპის.
- ნახ.1.7 38გვ. კონდუქტომეტრული გადამწოდის ერთ-ერთი სახე.
- ნახ.1.8 39გვ. ტევადური კონდუქტომეტრული უჯრედების ჩანაცვლების ექვივალენტური ელ.სქემები
- ნახ.1.9 45გვ. ინდუქციური გადამწოდის ერთ-ერთი სახე
- ნახ.1.10 46გვ. ინდუქციური კონდუქტომეტრული უჯრედების ჩანაცვლების ექვივალენტური ელ.სქემები
- ნახ.2.1 59 გვ. კონდუქტომეტრის სტრუქტურული სქემა
- ნახ.2.2 60გვ. კვაზისტატიკური კონდუქტომეტრული გაზომვის პრინციპიალური სქემა.
- ნახ.2.3 67 გვ. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების სქემები
- ნახ.2.4 76გვ.ძაბვის აქტიური მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები ერთი ტრანსფორმატორის შემთხვევაში.
- ნახ.2.5 78გვ. კუთრ ელექტროგამტარობასთან დამოკიდებულების გრაფიკი
- ნახ.2.6 78გვ. დენის რეაქტიული მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარობასთან დამოკიდებულების გრაფიკი სხვადასხვა დიაპაზონში.
- ნახ.2.7 80გვ. ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისთვის ა-დენის რეაქტიული მდგენელისა და ბ-ძაბვის აქტიური მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-100სიმ/მ დიაპაზონში.
- ნახ.2.8 80გვ. ა- ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისთვის ძაბვის რეაქტიული მდგენელისა და ბ- მრავალგრაგნილიანი კონდუქტომეტრებისთვის დენის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების კუთრ ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-100სიმ/მ დიაპაზონში.
- ნახ.2.9 83გვ. მრავალგრაგნილიანი კონდუქტომეტრებისთვის ა-ძაბვისა

- და ბ-დენის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების კუთრ ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები 0,1-100სიმ/მ დიაპაზონში.
- ნახ.2.10 84გვ. ა-საერთო კვანძის მქონე ინდუქციურად დაკავშირებული ელემენტები, ბ-მათი ექვივალენტური სქემა.
- ნახ.2.11 86 გვ. ა) სამგრაგნილიანი საზომი ტრანსფორმატორის სქემა, ბ) ნაკადების მიმართულება.
- ნახ.3.1 90გვ. ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრისთვის ა-ძაბვის აქტიური და ბ-ძაბვის რეაქტიული მდგენელების მგრძნობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-10სიმ/მ დიაპაზონში.
- ნახ.3.2 91გვ. ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრისთვის: ა-დენის აქტიური და ბ-დენის რეაქტიული მდგენელების მგრძნობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-10სიმ/მ დიაპაზონში.
- ნახ.3.3 92გვ. ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრისთვის: ა-დენის აქტიური და ბ-დენის რეაქტიული მდგენელების მგრძნობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-10სიმ/მ დიაპაზონში.
- ნახ.3.4 93გვ. ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრისთვის: ა-ძაბვის აქტიური და ბ-ძაბვის რეაქტიული მდგენელების მგრძნობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-100სიმ/მ დიაპაზონში.
- ნახ.3.5 94გვ. ორტრანსფორმატორიანი ოთხგრაგნილიანი კონდუქტომეტრისთვის: ა-დენის აქტიური და ბ-ძაბვის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების მგრძნობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-100სიმ/მ დიაპაზონში.
- ნახ.3.6 95გვ. ორტრანსფორმატორიანი სამგრაგნილიანი კონდუქტომეტრისთვის: ა-დენისა და ბ-ძაბვის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების მგრძნობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-100სიმ/მ დიაპაზონში.
- ნახ.3.7 99გვ. კონდუქტომეტრის საშუალო კვადრატული ცდომილების დამოკიდებულების გრაფიკი: ა-ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის კუთრი ელ.გამტარობისა და დენის რეაქტიულ მდგენელზე, ბ-მრავალგრაგნილიანი კონდუქტომეტრის კუთრი ელ.გამტარობისა და ძაბვის აქტიურ და რეაქტიულ მდგენელებზე.
- ნახ.3.8 105გვ. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ოპტიმალური პროექტირების ალგორითმის ბლოკ-სქემა.
- ნახ. 4.1 107გვ. სქემის გამოსავალი სიგნალის მკვებავი დენის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი: 1-ერთტრანსფორმატორიანი და 2-ორტრანსფორმატორიანი სქემებისთვის.
- ნახ.4.2 109გვ. გამოსავალი ძაბვის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი ხვიათა სხვადასხვა რიცხვისათვის: ა-ერთტრანსფორმატორიანი სქემისათვის და ბ-ორტრანსფორმატორიანი სქემის პირველ ტრანსფორმატორზე,

- 1-67 ხვია, 2-40 ხვია, 3-20 ხვია.
- ნახ.4.3 110გვ. გამოსავალი ძაბვის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი ხვიათა სხვადასხვა რიცხვისათვის: ორტრანსფორმატორიანი სქემის მეორე ტრანსფორმატორზე, 1-67 ხვია, 2-40 ხვია, 3-20 ხვია.
- ნახ.4.4 110გვ. ა-გაზომვის ორტრანსფორმატორიანი და ბ-ერთტრანსფორმატორიანი სქემის სტატიკური მახასიათებლები: 1- ექსპერიმენტული; 2- მათემატიკური მოდელით.
- ნახ.4.5 112გვ. თხევადხვიათი კონდუქტომეტრის ჩანაცვლების სქემა.
- ნახ.4.6 116გვ. ე.მ.დ. მაგნიტურ შეღწევადობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები.
- ნახ.4.7 116გვ. ე.მ.დ. მაგნიტურ შეღწევადობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები.
- ნახ.4.8 116გვ. ე.მ.დ. მაგნიტურ შეღწევადობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები.
- ნახ.4.9 121გვ. ა-ტრანსფორმატორული ბოგა, ბ-წრედში მოქმედი ერთი $\dot{E}_{\text{ექსპ.ე.მ.დ.}}$
- ნახ.4.10 125გვ. მგრძნობიარობის დამოკიდებულების საზომი ბოვირების ელექტრულ და გეომეტრიულ პარამეტრებზე ბლოკ-სქემა.
- ნახ.4.11 126გვ. მგრძნობიარობის დამოკიდებულება: ა-მაგნიტოგამტარის მაგნიტურ შეღწევადობაზე, ბ-ბოგას მხრების გრაგნილების ხვიათა რიცხვზე.
- ნახ.4.12 126გვ. მგრძნობიარობის დამოკიდებულება: ა-მაგნიტოგამტარის საშუალო სიგრძისა და განივკვეთის ფართობის ფარდობაზე, ბ-გრაგნილების ომურ წინააღობაზე.
- ნახ.4.13 127 გვ. მგრძნობიარობის დამოკიდებულება სიხშირეზე.

შესავალი

სამუშაოს აქტუალურობა. თანამედროვე წარმოების განვითარება და დახვეწა, ტექნოლოგიური დონის ამაღლება, გამოშვებული პროდუქციის ხარისხი პირდაპირ დაკავშირებულია ტექნოლოგიური პროცესის კონტროლის დახვეწასთან და ტექნოლოგიური პროცესების ავტომატური მართვის სისტემებთან.

ავტომატური მართვის სისტემების ერთერთი ფუნქციაა წარმოების პროცესის ტექნოლოგიური პარამეტრების კონტროლი და გამოშვებული პროდუქციის ხარისხის შეფასება. რამდენად ზუსტად, საიმედოდ და სწრაფად ხორციელდება ეს კონტროლი დამოკიდებულია ტექნოლოგიური პროცესის გადამწოდებასა და საზომ საშუალებებზე.

კონდუქტომეტრია ერთ-ერთი მარტივი, უნივერსალური, დახვეწილი და ამავე დროს კვლევის ზუსტი ელექტროქიმიური მეთოდია ნივთიერების ისეთი ინფორმაციული პარამეტრის კვლევისა და ანალიზის საქმეში, როგორცაა კუთრი ელექტროგამტარობა. მისი საშუალებით ზომავენ ბინარული ხსნარების კონცენტრაციას, საზღვრავენ თერმოდინამიკურ მუდმივებს, ასევე იმ სიდიდეებს, რომლებიც ახასიათებენ ხსნარების შემადგენლობას, დიფუზიის კოეფიციენტს, იონების ადსორბციას ელექტროდ-ელექტროლიტის საზღვარზე, ელექტროლიტების იონურ შემადგენლობას და ა.შ.

კონდუქტომეტრები და კონდუქტომეტრული გადამწოდები ლაბორატორიულ და სამეცნიერო პრაქტიკის გვერდით უფრო და უფრო ფართო გამოყენებას პოულობენ კვების, ფარმაცევტულ, ქიმიურ, მიკრობიოლოგიურ, ენერგეტიკულ, ნავთობგაზისა და მრეწველობის სხვა დარგებში. მათი გამოყენება ძირითადად დაკავშირებულია ხარისხის განსაზღვრასა და კონტროლთან. ტექნოლოგიური პროცესების კინეტიკისა და სტაბილიზაციის კონტროლისათვის გამოიყენება თხევადი ტექნოლოგიური გარემო.

კონდუქტომეტრული მეთოდის ფართოდ გავრცელება შეიძლება აიხსნას მისი მაღალი სიზუსტით, გაზომვის ფართო დიაპაზონით, აპარატურის სიმარტივით, ტექნოლოგიური ნაკადის უწყვეტი

კონტროლის შესაძლებლობითა და სხვა ანალოგიურ ტექნიკასთან შედარებით დაბალი ღირებულებით.

კონდუქტომეტრული მეთოდის დახვეწა პირდაპირ დაკავშირებულია წარმოების, ტექნიკისა და ტექნოლოგიების განვითარებასთან. ჩნდება სულ უფრო მეტი წარმოებები, სადაც ხსნარებისა და ელექტროლიტების კუთრი ელექტროგამტარობის კონტროლი არა მარტო სასურველი, არამედ აუცილებელიცაა. ახალი ტექნოლოგიების გამოყენება იძლევა მაღალი მგრძნობიარობის ელემენტებისა და უჯრედების ახალი მოდელების შექმნის საშუალებას.

წარმოების განვითარება ხელსაწყოთა დამამუშავებლების წინაშე აყენებს მკაცრ მოთხოვნებს სტაბილურობის, მგრძნობიარობის, სიზუსტის, საიმედოობისა და სხვათა მიმართ.

ხსნარებისა და აირის ნაირსახეობის შენადნობების ფიზიკო-ქიმიური თვისებების ანალიზისათვის უნივერსალურ მეთოდს წარმოადგენს უკონტაქტო კონდუქტომეტრია, რომელიც ხასიათდება სიმარტივითა და საიმედოობით.

უკონტაქტო კონდუქტომეტრიის ერთ-ერთ სახეს წარმოადგენენ ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრები, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება ნავთობქიმიურ, ქიმიურ, ფარმაცევტულ, კვებისა და მრეწველობის დარგებში, როგორც ტექნოლოგიური პარამეტრებისა და გამოშვებული პროდუქციის ხარისხის მაკონტროლირებელი ხელსაწყოები.

მოცემული ხელსაწყოების მოთხოვნილებებზე მეტყველებს ის ფაქტი, რომ ყველა მსხვილ ხელსაწყოთა მშენებლობის ორგანიზაციებს თავის ასორტიმენტში გააჩნიათ ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების მთელი რიგი, რომელთა დახვეწა-განვითარება კვლავაც გრძელდება. ეს განისაზღვრება იმით, რომ მსგავს ხელსაწყოებს არ გააჩნიათ კონტაქტი საკვლევ ხსნართან, ამიტომაც ისინი შეიძლება იყვნენ დამონტაჟებულნი სხვადასხვა ტექნოლოგიურ დანადგარებში და მილგამტარებში და შეუძლიათ გაზომონ როგორც ნეიტრალური, ასევე აგრესიული გარემო.

სამუშაოს მიზანი: ელექტრული წრედების თეორიის საფუძველზე ორმაგი ტრანსფორმატორული საზომი ბოგირის ოპტიმალური პარამეტრების დადგენის მიზნით მათემატიკური მოდელის დამუშავება და მის საფუძველზე მგრძობიარობის ამალგების შესაძლებლობის გამოკვლევა.

ძირითადი ამოცანები: დასახული მიზნის შესაბამისად ფორმულირებული იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. ჩატარდეს კონდუქტომეტრული ანალიზის არსებული მეთოდების მიმოხილვა;
2. გაანალიზებული იქნეს კონდუქტომეტრების გამოყენება მრეწველობისა და წარმოების სხვადასხვა დარგებში, ასევე ბუნებრივი გარემოს, ნივთიერებების, ნაკეთობის კონტროლისათვის;
3. განხილულ იქნეს შედარებით მეტად გავრცელებული კონდუქტომეტრული პირველადი საზომი გარდამსახები;
4. დამუშავებულ იქნას კონდუქტომეტრის პირველადი საზომი გარდამქმნელის მათემატიკური მოდელი;
5. დამუშავებული მათემატიკური მოდელის საფუძველზე განისაზღვროს კონდუქტომეტრული უჯრედის მაქსიმალური მგრძობიარობის შესაბამისი ოპტიმალური კონსტრუქციული და ელექტრომაგნიტური პარამეტრები.

კვლევის მეთოდები. სადისერტაციო სამუშაოს შესრულებისას გამოყენებული იქნა თეორიული და ემპირიული შემეცნებითი მეთოდები. თეორიულ დონეზე ეს მეთოდებია ელექტრული წრედებისა და გაზომვების თეორია. ემპირიულ დონეზე გამოყენებული იქნა ფიზიკური და მათემატიკური მოდელირების მეთოდები.

სამეცნიერო სიახლე:

1. ელექტრული წრედების თეორიის საფუძველზე დამუშავებული იქნა თხევადხვიანი კონდუქტომეტრული საზომი გარდამქმნელის მათემატიკური მოდელი;
2. დამუშავებული მათემატიკური მოდელის საფუძველზე დადგენილი იქნა თანაფარდობანი გამოსასვლელ სიგნალს (ძაბვას), გასაზომ გამტარობასა და კონდუქტომეტრის გადამწოდის ელექტრულ და მაგნიტურ პარამეტრებს შორის;
3. დადგენილია მაღალი მგრძობიარობის კონდუქტომეტრის დამზადებისათვის მაგნიტური პარამეტრების შერჩევის კრიტერიუმები;

პრაქტიკული ღირებულება: სადისერტაციო სამუშაოში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოების შესრულებისა და პროდუქციის ხარისხის, ელექტროლიტის ხსნარების კონცენტრაციის განსაზღვრისა და წყალსატევების გაჭუჭყიანების კონტროლისათვის კონდუქტომეტრული საზომი გარდამქმნელების დამუშავების დროს

პუბლიკაციები. სადისერტაციო სამუშაოების შედეგები გამოქვეყნებული იქნა ოთხ სამეცნიერო სტატიაში:

სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა სტუ-ს სტუდენტთა ღია 80-ე (2012 წ) საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე

დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავალისა და 4 თავისაგან, რომლებიც გადმოცემულია 134 გვერდზე. შეიცავს 42 ნახაზს, 4 ცხრილს და 41 დასახელების ლიტერატურას.

ლიტერატურული მიმოხილვა

თანამედროვე წარმოებაში პროდუქციის ხარისხი, უწყვეტლივ დაკავშირებულია კონტროლის მეთოდების განვითარებასა და დახვეწასთან. ერთ-ერთ ასეთ მეთოდს მიეკუთვნება კონტროლის კონდუქტომეტრული მეთოდი, რომელიც ამჟამად აქტიურად ვითარდება და გამოიყენება ქიმიურ, კვების, ფარმაცევტულ, გაზის, ნავთობისა და წარმოების სხვადასხვა დარგში [1,2,3,4,5].

XXI საუკუნის დასაწყისში ნათელი გახდა, რომ ელექტროქიმიური ანალიზი გამოვიდა თავისი კლასიკური შინაარსის ფარგლებიდან. თუკი ადრე ელექტროქიმიური ანალიზის მეთოდოლოგია უმეტესწილად ვითარდებოდა არაორგანული ბუნების მქონე ობიექტების საფუძველზე. ამჟამად ელექტროქიმიური ანალიზი მკვეთრად იხრება ეკოლოგიის პრობლემის გადაწყვეტის მხარეს, ასევე ფართოდ გამოიყენება სამედიცინო და ბიოლოგიური ობიექტების ანალიზისათვის, რომელშიც ორგანული ნივთიერება სულ უფრო ხშირად გვხვდება. კონდუქტომეტრიული მეთოდები იყოფა ორ დიდ ჯგუფად: ამპლიტუდური, ამპლიტუდურ-ფაზური და სიხშირული [1,2,3,6,7,8] პირველ ჯგუფში, ამპლიტუდა ან ამპლიტუდა და ფაზა გადიან სიგნალის კონდუქტომეტრულ უჯრედში და ფუნქციონალურად არიან დაკავშირებულნი ელექტროლიტის ელექტროგამტარობასთან. მეორე ჯგუფში – ელექტროგამტარებლობა განსაზღვრავს ცვლადი დენის სიხშირეს.

გადამწოდის სამზომ წრედთან კონტაქტის გაღვანური კონტაქტის მიხედვით კონდუქტომეტრები იყოფა კონტაქტურ და არაკონტაქტურ კონდუქტომეტრებად [4,9,10,11].

მკვებავი ძაბვის ტიპის მიხედვით კონდუქტომეტრული მეთოდები იყოფიან მუდმივი და ცვლადი დენების მეთოდებად, ხოლო ეს უკანასკნელნი კი იყოფიან: დაბალ და მაღალსიხშირულ მეთოდებად, რომელთა პირობითი ზღვარი გადის 40-50 კჰც ფარგლებში.

თავი I

1.1 ელექტროგამტარობის გაზომვის ხერხები

კონდუქტომეტრიული მეთოდები იყოფა ორ დიდ ჯგუფად: ამპლიტუდური, ამპლიტუდურ-ფაზური და სიხშირული [1,2,3,6,7,8]. პირველ ჯგუფში, ამპლიტუდა ან ამპლიტუდა და ფაზა გადიან სიგნალის კონდუქტომეტრულ უჯრედში და ფუნქციონალურად არიან დაკავშირებულნი ელექტროლიტის ელექტროგამტარობასთან. მეორე ჯგუფში – ელექტროგამტარებლობა განსაზღვრავს ცვლადი დენის სიხშირეს.

გადამწოდის სამზომ წრედთან კონტაქტის გაღვანური კონტაქტის მიხედვით კონდუქტომეტრები იყოფა კონტაქტურ და არაკონტაქტურ კონდუქტომეტრებად [4,9,10,11].

მკვებავი ძაბვის ტიპის მიხედვით კონდუქტომეტრიული მეთოდები იყოფიან მუდმივი და ცვლადი დენების მეთოდებად, ხოლო ეს უკანასკნელნი კი იყოფიან: დაბალ და მაღალსიხშირულ მეთოდებად, რომელთა პირობითი ზღვარი გადის 40-50 კჰც ფარგლებში.

კონდუქტომეტრიის განვითარება დაკავშირებულია კონტაქტურ მეთოდებთან. ეს მეთოდი ხასიათდება საკვლევი ხსნარის პირველად საზომ გარდამქმნელთან პირდაპირი გაღვანური კონტაქტის არსებობით და მათი მეშვეობით კი მზომ წრედთან.

კონტაქტური მეთოდები ხასიათდებიან მთელი რიგი ღირსებებით, კერძოდ:

- ისინი საშუალებას იძლევიან ვაწარმოთ ხსნარების კუთრი ელექტროგამტარობის ზუსტი გამოთვლები;
- გააჩნიათ გაზომვების ფართო დიაპაზონი;
- ისინი კარგად არიან შესწავლილი და აღწერილია მრავალ ლიტერატურულ წყაროში;
- მათი აპარატურა საკმაოდ მარტივია.

მათი ძირითადი ხარვეზებია:

- ელექტროდ-ელექტროლიტის ფაზათაშორის საზღვარზე პოლარიზაციის მოვლენების გამო გააჩნიათ ცდომილებები;

- თხევადი გარემოს გაზომვისას უცხო ნაწილაკების არსებობის გამო ხდება ელექტროდების სწრაფი დაჭუჭყიანება;
- მაღალი სიზუსტის გაზომვებისათვის განკუთვნილ კონდუქტომეტრებში აუცილებელია ძვირფასი მეტალების გამოყენება.

ამასთანავე ეს მეთოდები თავისი სიზუსტის, თეორიული დასაბუთების, აპარატურის საიმედოობის მოხერხებულობის გამო განსაკუთრებულ ადგილს იჭერენ. კონტაქტური და უკონტაქტო კონტაქტური მეთოდებით გაზომვის შედეგების უტყუარობის შედარებითი შეფასებისას, უპირატესობა ენიჭება პირველს, განსაკუთრებით კი, აბსოლუტური გაზომვების დროს.

უკონტაქტო მეთოდების გაჩენა დაკავშირებულია გაზომვის სიზუსტის გაზრდასთან, ფაზათაშორის საზღვარზე პოლარიზაციული ცდომილებების გამორიცხვის ხარჯზე. გარდა ამისა, არსებობს უკონტაქტო მეთოდების მთელი რიგი უპირატესობებისა კონტაქტურებთან შედარებით [6, 12,14,15]. სახელდობრ:

- ელექტროდებიდან ძვირფასი ლითონების გამოთავისუფლება (ოქრო, პლატინა, ვერცხლი) და იმ პროცედურების გამორიცხვა, რომლებიც დაკავშირებულია ელექტროდების ზედაპირის ძვირფასი ლითონებით აუცილებელი დაფარვისათვის;

- ელექტროდების დაბინძურებასთან და ელექტროდებზე მიმდინარე არასასურველი ქიმიურ და ელექტროქიმიურ პროცესებთან დაკავშირებული ცდომილებების აღმოფხვრა;
- ძლიერი ელექტროლიტების კონცენტრირებული ხსნარების კონტროლის შესაძლებლობა;
- მცირე მოცულობის მქონე ხსნარების ელექტროგამტარებლობის გაზომვის შესაძლებლობა;
- ქიმიურად აქტიური და ტოქსიკური ნივთიერებების ელექტროგამტარებლობის გაზომვა;-
- ამჟღავნებში მოთავსებული ნივთიერებების ელექტროგამტარობის გაზომვის შესაძლებლობა;
- მაღალ ტემპერატურაზე შენადნობების ელექტროგამტარებლობის განსაზღვრის შესაძლებლობა.

უკონტაქტო კონდუქტომეტრების ხარვეზებია:

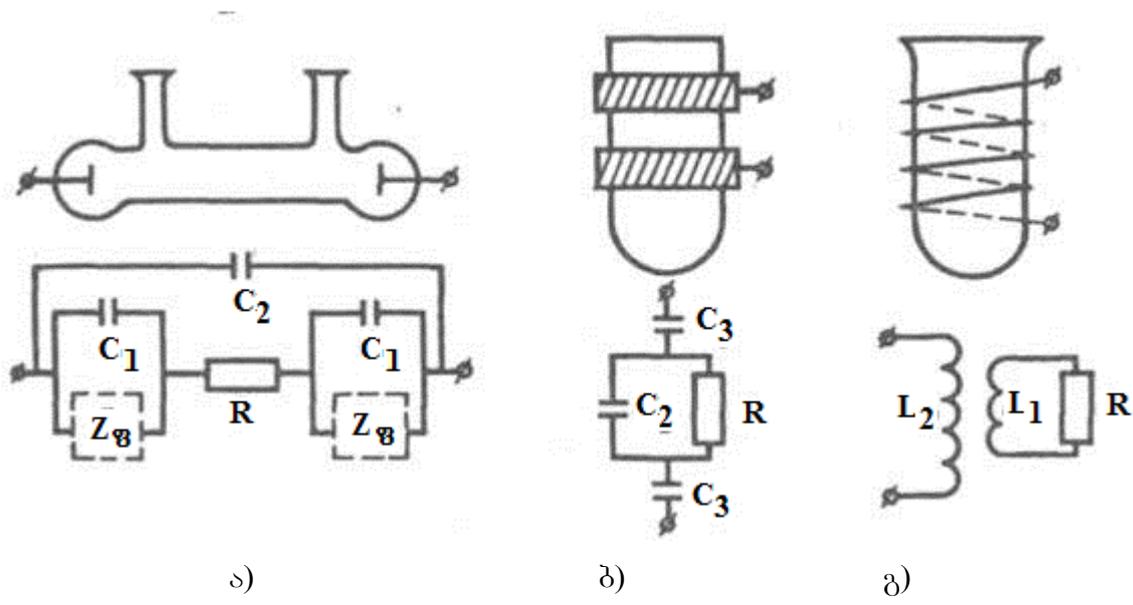
- გათბობისას, გაზომვის შედარებით დიდი ცდომილება (1%), რომელიც დაკავშირებულია ნიმუშის მოცულობის ცვლილების მიმართ მაღალ მგრძობიარობასთან;
- ხელსაწყოს რთული აგებულება და მექანიკური ვიბრაციების მიმართ მგრძობიარობა;
- უკონტაქტო მეთოდის თეორია, განსაკუთრებით ელექტროდ-ელექტრო-ლიტის საზღვარზე ნაკლებადაა დამუშავებული, ვიდრე კონტაქტური კონდუქტომეტრის თეორია, ამიტომ ზუსტი გაზომვებისას უპირატესობა ენიჭება კონტაქტურ კონდუქტომეტრებს.

1.2 კონდუქტომეტრული გადამწოდების სახესხვაობები

კონდუქტომეტრები შედგება ორი ძირითადი ნაწილისაგან: გადამწოდისაგან, რომელიც საჭიროა კუთრი ელექტროგამტარებლობის გაზომვისათვის და პირველადი საზომი გარდამქმნელის – იმპედანსის საზომი მოწყობილობისაგან. კონდუქტომეტრული ხელსაწყოს ერთ-ერთი ძირითადი ელემენტია უჯრედი. იგი რთული ელემენტია, რომელიც ახდენს მთელი გაზომვის პროცესის სიზუსტის ამაღლების შესაძლებლობის ლიმიტირებას. თანამედროვე ელექტროგამტარებლობის გაზომვის პრაქტიკაში გამოიყენება კონდუქტომეტრული უჯრედის შემდეგი ტიპები:

- კონტაქტური კონდუქტომეტრული უჯრედები;
- უკონტაქტო ტევადობითი უჯრედები;
- უკონტაქტო ინდუქციური უჯრედები;

ნახ.1.1. წარმოდგენილია კონდუქტომეტრული უჯრედები და მათი ექვივალენტური სქემები.



ნახ.1.1. კონდუქტომეტრული უჯრედები და მათი ექვივალენტური სქემები: ა- კონტაქტური უჯრედი; ბ- ტევადური უჯრედი; გ- ინდუქციური უჯრედი; R – ელექტროლიტის წინაღობა; C₁- ელექტროდ-ელექტროლიტის ფაზათაშორის საზღვარზე ორმაგი ელექტრული ფენის ტევადობა; C₂- ხსნარის ტევადობა; C₃- ხსნარით, უჯრედის კედლითა და გარე ელექტროდით შექმნილი კონდენსატორის ტევადობა; Z_გ – ფარადეის იმპედანსი, რომელიც დაკავშირებულია ელექტროდ-ელექტროლიტის საზღვარზე მიმდინარე ელექტროქიმიურ რეაქციასთან; L₁ და L₂ – შესაბამისად ელექტროლიტისა და კოჭის ინდუქციურობებია.

არსებობს ფიზიკურ-ქიმიურ გამოკვლევებსა და ტექნოლოგიური პროცესების კონტროლისათვის გამოყენებული კონტაქტური და უკონტაქტო გადამწოდების პირველადი საზომი გარდამქმნელების კონსტრუქციების მრავალი სახესხვაობა. ეს განპირობებულია ამოცანების უზარმაზარი სპექტრით, რომელთა ამოხსნა ხდება გარემოს კუთრი ელექტრული გამტარობის დახმარებით, სადაც პირველადი მზომი გარდამქმნელი წარმოადგენს ინფორმაციის წყაროს გასაზომი სიდიდის შესახებ და ამასთან ცდომილებების ძირითად წყაროს. ამიტომ კონდუქტომეტრის დაპროექტებისას განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა უჯრედის დამუშავებას. ელექტროდებს შორისი სივრცის შევსების მიხედვით განარჩევენ შემდეგი სახის უჯრედებს: ჩაძირული, გამდინარე-ჩაძირული, გამდინარე, რომელთა ზოგადი სახე წარმოდგენილია ნახ.1.2-ზე.



ბ)



გ)



ა)

ნახ. 12. კონდუქტომეტრული უჯრედების სახეები: ა- ჩაძირული; ბ- გამდინარე-ჩაძირული; გ- გამდინარე.

ჩაძირული ტიპის უჯრედი გამოიყენება ლაბორატორიულ პირობებში ჩასატარებელი გაზომვებისათვის, დანარჩენი ორი კი, საწარმოო ამოცანების გადაწყვეტისას.

13. კონტაქტური კონდუქტომეტრული გადამწოდები

კონტაქტური გადამწოდები (უჯრედები) გამოირჩევიან გაცილებით მეტი სიზუსტით, ვიდრე უკონტაქტო. ისინი გამოიყენებიან მაღალი სიზუსტის გაზომვებისათვის, როგორც ლაბორატორიებში ასევე სამრეწველო პრაქტიკაში, თუმცა თითქმის ყველა კონტაქტური უჯრედებისათვის საერთო ნაკლს წარმოადგენს ფარადეის პროცესები, რომლებსაც ადგილი აქვს ელექტროდ-ელექტროლიტის გამყოფ საზღვარზე საკვლევი სითხის აქტიური წინაღობის გაზომვისას. კონტაქტურ კონდუქტომეტრიაში ცვლადი დენის გამოყენება არ გვაზღვევს პოლარიზაციის მოვლენისაგან. ცვლადი დენის დროს ჩნდება დამატებითი ცდომილებები, რომლებიც უჯრედის ტევადობითი თვისებების გაჩენასთანაა დაკავშირებული. დასმულ ამოცანასთან და გაზომვის აუცილებელ სიზუსტესთან

დაკავშირებით თანამედროვე კონდუქტომეტრული უჯრედები მზადდება ორი, სამი ან ოთხელექტროდიანი.

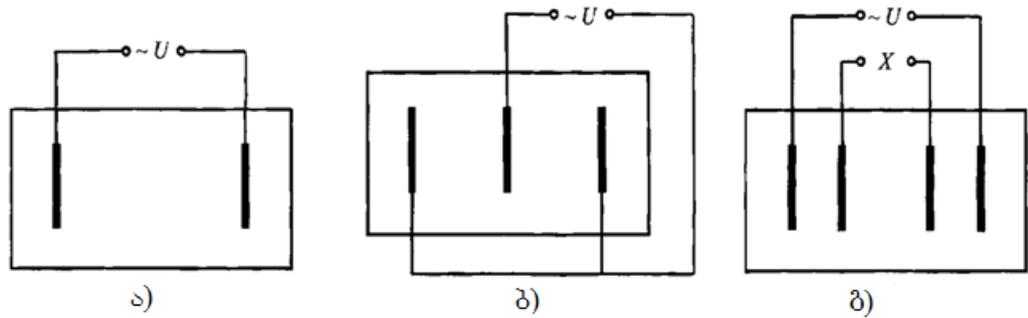
პირველად დამუშავებულ იქნა ორელექტროდიანი უჯრედები (ნახ. 1.3 ა.). მათში ელექტროდებს გააჩნიათ ორმაგი დატვირთვა: ემსახურებიან მოქმედი დენის გატარებას და იცილებენ ძაბვის ვარდნას, რომელიც წარმოიქმნება საკვლევ ხსნარში. ამ მოვლენას მიყვავართ ელექტროდებზე პოლარიზაციული მოვლენების სრული გამორიცხვის შეუძლებლობამდე დაბალი სიხშირეებისას და შესაბამისად გაზომვის სიზუსტის შემცირებასთან.

ნახ.1.3 (ბ,გ) გამოსახულია სამ და ოთხელექტროდიანი პირველადი საზომი გარდამქმნელი, რომლებიც იმისათვის შეიქმნენ, რომ შემცირებულიყო ცდომილებების წყაროების გავლენა. ისინი დაკავშირებულნი არიან ელექტროქიმიურ პროცესებთან ელექტროდ-ელექტროლიტის გამყოფ საზღვარზე. მათი გამოყენება ამცირებს პოლარიზაციული იმპედანსის, C_n და R_n მდგენელების გავლენას გაზომვის შედეგებზე.

ორელექტროდიანი უჯრედისაგან განსხვავებით, ოთხელექტროდიან უჯრედში ელექტროდების ფუნქციები დაყოფილია. ოთხელექტროდიან უჯრედების ნაპირებზე განლაგებულია ორი დენური ელექტროდი, რომლებიც ემსახურებიან ცვლადი დენის მიყვანას უჯრედამდე, ცენტრალური ელექტროდები კი, წარმოადგენენ საზომ ელექტროდებს.

ოთხელექტროდიანი უჯრედით ზუსტი გაზომვისათვის აუცილებელია დაგიცვათ შემდეგი პირობები:

- სტაბილური უნდა იყოს უჯრედში გამავალი დენი;
- დენმა არ უნდა გამოიწვიოს მნიშვნელოვანი სითბური ეფექტები;
- ელექტროდებზე მიერთებულმა საზომმა მოწყობილობამ არ უნდა გამოიყენოს დენი, ანუ გაზომვებისას ელექტროდები არ უნდა პოლარიზდებოდეს.



ნახ.13. კონტაქტური კონდუქტომეტრული უჯრედის სქემები: ა- ორელექტროდიანი; ბ- სამელექტროდიანი; გ- ოთხელექტროდიანი.

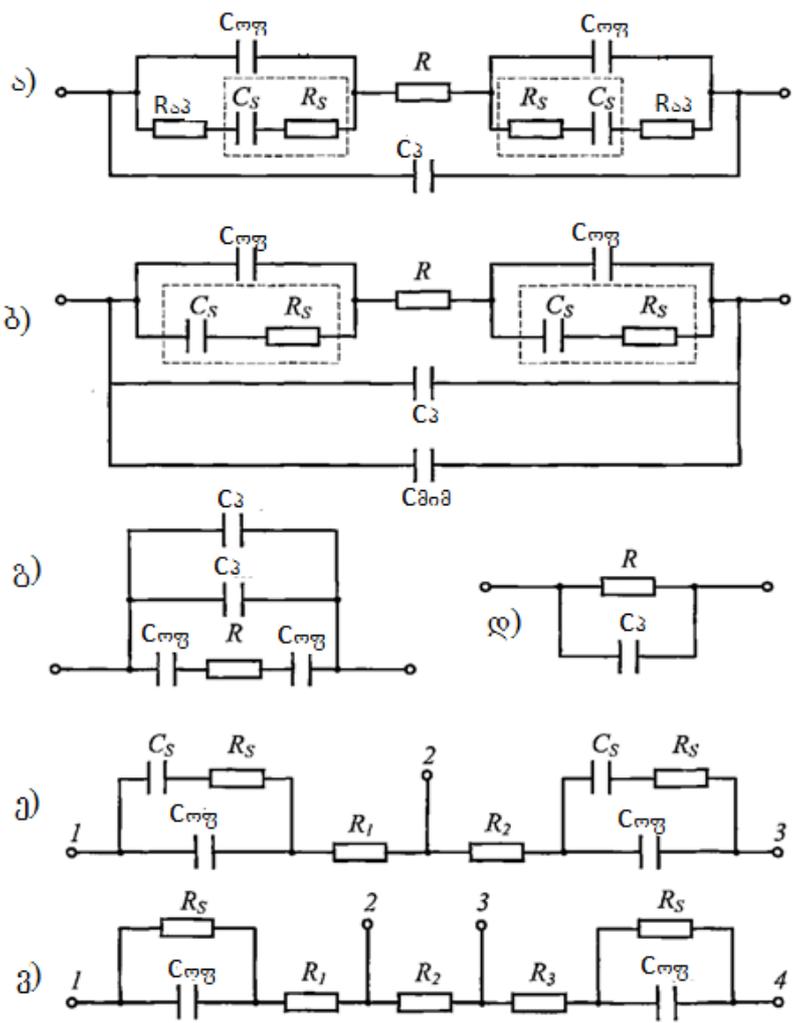
ელექტრული პროცესების განხილვისას, რომლებიც მიმდინარეობენ ელექტროლიტურ უჯრედებში, იყენებენ ჩანაცვლების ეკვივალენტურ ელექტრულ სქემას. ამ სქემის მრავალნაირი ვარიანტია შემოთავაზებული. გავრცელებულია ნახ.14.ა სქემაზე წარმოდგენილი ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემა ორელექტროდიანი უჯრედისათვის.

იგი შეიცავს საზომი ნივთიერების R -წინააღმდეგობას, $C_{ფ}$ - ელექტროდების ორმაგი ელექტრული ფენის ტევადობას, C_p - პარაზიტულ ტევადობებს, R_s - წინააღმდეგობას, რომელიც არის ვარბურგის იმპედანსის (კომპლექსური წინააღმდეგობის) აქტიური მდგენელი, C_s - ტევადობას, რომელიც წარმოადგენს ვარბურგის იმპედანსის რეაქტიულ მდგენელს, ასევე C_s - მიმყვანი სადენების ტევადობას.

ვარბურგის იმპედანსი (impedance-ინგლისურად, ხოლო, ლათინურად იმპედანსი-ვეწინააღმდეგობები), ეს არის ელექტროქიმიური იმპედანსი ანუ ელექტროქიმიური სისტემის კომპლექსური წინააღმდეგობა, რომელსაც ეს სისტემა უწევს მასში გამავალ ცვლად დენს და რომელიც გამოისახება ფორმულით:

$$Z = R_s + 1/j\omega C_s \quad (1.1)$$

სადაც ω - მკვებავი ძაბვის კუთხური სიხშირეა, რად/წმ; j - წარმოსახვითი კოეფიციენტი.



ნახ.14. კონტაქტური კონდუქტომეტრული უჯრედების ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემები. R —სხნარიანი გადამწოდის ომური წინაღობა; $C_{ოფ}$ —ორმაგი ელექტრული ფენის ტევადობა; C_3 —პარაზიტული ტევადობა; $C_{მომ}$ —მიმყვანი სადენების ტევადობა; R_s, C_s —წინაღობა და ტევადობა, რომლებიც განსაზღვრავენ ვარბურგის იმპედანსის აქტიურ და რეაქტიულ მდგენელს; $R_{აპ}$ —აქტივიზაციური პოლარიზაციის წინაღობა

ყველაზე ხშირად სისტემის ელექტროქიმიურ იმპედანსს გამოსახავენ მიმდევრობით შეერთებულ R_s წინაღობითა და C_s ტევადობით (ნახ.14.ა,ბ). აქტიური წინაღობა R_s გამოსახავს ელექტროლიტის ელექტრული წინაღობის გავლენას, ანუ ელექტროდ—ელექტროლიტის საზღვარზე მუხტების გადატანის შენელებას. ტევადური წინაღობა $1/j\omega C_s$, გამოსახავს ორმაგი ელექტრული ფენის ტევადობას.

ვარბურგის იმპედანსში შემავალი აქტიური წინაღობა და რეაქტიული ტევადობა გამოისახებიან ფორმულებით:

$$R_s = + \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} \quad (1.2)$$

$$C_s = \frac{1}{\sqrt{\omega}} \quad (1.3)$$

სადაც R_s — მუხტის გადატანის აქტიური წინაღობა, σ — ვარბურგის იმპედანსის კოეფიციენტი. ნახ.1.4.ა-ზე მოცემული ჩანაცვლების ეკვივალენტური სქემის სრული წინაღობა კი ტოლი იქნება:

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C + R_s} \quad (1.4)$$

სქემა შეიძლება მნიშვნელოვნად გამარტივდეს თუ $C_{\text{ოფ}}$ ტევადობა საკმარისად დიდია, ხოლო საზომი წრედის კვების ძაბვის სიხშირე ისეა შერჩეული რომ, ორმაგი ელექტრული ფენის ტევადობის წინაღობასა ($R_{\text{ოფ}}$) და (Z_s) ვარბურგის იმპედანსს შორის მყარდება შემდეგი დამოკიდებულება: $R_{\text{ოფ}} \ll |Z_s|$, მაშინ ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემა მიიღებს ნახ.1.4.გ-ზე მოცემულ სახეს.

პირველადი საზომი გარდამსახების კვების ძაბვის სიხშირეზე განხორციელებული ცვლილებებისას, რომელთა დროსაც სამართლიანია $R_{\text{ოფ}} \ll R$ დამოკიდებულება, ჩანაცვლების ეკვივალენტურ სქემას ექნება ნახ.1.4დ გამოსახული მარტივი სახე.

სამელექტროდიანი კონტაქტური პირველადი საზომი გარდამქმნელის ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემა, რომელშიც არ არის გათვალისწინებული პირველადი საზომი გარდამქმნელის ელექტროდებს შორის გეომეტრიული ტევადობის არსებობა, გამოსახულია ნახ.1.4-ე, 1, 2, 3 – ამ პირველადი საზომი გარდამქმნელის ელექტროდებია. საკვლევი ხსნარის მოცულობების წინაღობები R_1 და R_2 არ არის ერთმანეთის ტოლი.

ოთხელექტროდიანი კონტაქტური პირველადი საზომი გარდამქმნელის ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემა

წარმოდგენილია ნახ.14-ვ. საკვლევი ხსნარის გასაზომი მოცულობის წინაღობა, 1 და 4 დენურ ელექტროდებს შორის, შედგება სამი მიმდევრობით შეერთებული წინაღობებისაგან R_1 , R_2 , და R_3 . საკვლევი ხსნარის უბანზე ძაბვის ვარდნა, რომელსაც გააჩნია R_2 წინაღობა, იხსნება 2 და 3 პოტენციალური ელექტროდებით.

როგორც უკვე ვახსენეთ, კონტაქტურ კონდუქტომეტრიაში პირველადი საზომი გარდამქმნელი წარმოადგენს ცლომილებების ძირითად წყაროს, ამიტომ კონდუქტომეტრული უჯრედების პროექტირებისას, აუცილებელია გავითვალისწინოთ მთელი რიგი პარამეტრებისა, რომლებიც გავლენას ახდენენ პოლარიზაციული წინაღობის სიდიდეზე. ამ უჯრედების შესაქმნელად გამოიყენება მთელი რიგი ნივთიერებებისა, რომლებიც გავლენას ახდენენ ΔR_n სიდიდეზე (ΔR_n —პოლარიზაციული წინაღობა). პოლარიზაციული წინაღობების მნიშვნელობები ელექტროდების სხვადასხვა მასალისათვის წარმოდგენილია ცხრილი 1.1-ში.

ცხრილი 1.1 პოლარიზაციული წინაღობები ელექტროდების სხვადასხვა მასალისათვის

ჯგუფის №	ლითონი ან შენადნობი	ΔR_s , ომი
1	Zn, Cd, Hg, Pb, Bi, In, Ag, Au, Ir, Os	ძალიან დიდია და ელექტროდად არ გამოიყენება
2	Sn, Mo, Co, W, Cr	ასევე
3	IX18H9T მარკის უჟანგავი ფოლადი Fe, Ge, Cu, Ni, Al, თითბერი	2,10 0,15
4	გლუვი Pt, Pd, Rh, Os-სეკვადი, Ir-სეკვადი	0,9
	Ta, Ru, Nb, Th, V, La, Ce, Zr	0,28 ზედაპირი იფარება ჟანგეულის ფენით 0,13
6	Pt-სეკვადი; d -სეკვადი	პრაქტიკულად 0

ყველა გამოკვლეული ლითონები და შენადნობები ΔR_n სიდიდის მიხედვით შეიძლება დავეოთ 6 ჯგუფად.

პირველი და მეორე ჯგუფის მეტალები ქმნიან ძალზე დიდ პოლარიზაციულ წინააღმდეგობას და ელექტროდების სახით კონდუქტომეტრიაში არ გამოიყენებიან. მეტალები, რომლებიც მიუკუთვნებიან მესამე, მეოთხე და მეხუთე ჯგუფებს, ქმნიან შედარებით მცირე პოლარიზაციულ წინააღმდეგობას და შეიძლება გამოიყენებულ იქნენ კონდუქტომეტრიაში, როგორც ელექტროდის დასამზადებელი მასალა. მეექვსე ჯგუფის მეტალებს პოლარიზაციული წინააღმდეგობის სიდიდე თითქმის ნულის ტოლი აქვთ, ამიტომ ისინი გაცილებით ხშირად გამოიყენებიან ელექტროდების სახით.

ელექტროდის ზედაპირის მდგომარეობა მნიშვნელოვნად ახდენს გავლენას იმპედანსის სიდიდეზე. პოლარიზაციული იმპედანსის დამოკიდებულება ელექტროდის ზედაპირის მდგომარეობაზე მოცემულია ცხრილი 12-ში.

ცხრილი 12. პოლარიზაციული იმპედანსის დამოკიდებულება ელექტროდის ზედაპირის მდგომარეობაზე.

ელექტროდის მასალა	ზედაპირის მდგომარეობა	Zs ფარდობითი სიდიდე
პლატინა	პლატინირებული	1
	მსუბუქად პლატინირებული	11,3
	გლუვი	990
თითბერი	პლატინირებული	6,4
	ამოჭმული და	25,8
	გრაფინირებული	54
	ამოჭმული პოლირებული	54

ცხრილი 12-დან გამომდინარეობს, რომ ელექტროდებისათვის, რომლებიც დამზადებულნი არიან სხვადასხვა ნივთიერებებისგან, ნამდვილი ზედაპირის განვითარება ამცირებს პოლარიზაციულ მოვლენებს, რადგან მცირდება დენის სიმკვრივე და პოლარიზაციული ეფექტი.

ცხრილი 13-ში მოცემულია დამოკიდებულება პოლარიზაციულ წინააღმდეგობასა და პლატინირების ხარისხს შორის.

როგორც ცხრილი 13-ის მონაცემებიდან ჩანს, ცდომილება, რომელსაც ქმნის პოლარიზაციული წინაღობა, ელექტროგამტარებლობის გაზომვებისას შეიძლება მნიშვნელოვნად შევამციროთ, თუ გამოვიყენებთ პლატინის ელექტროდებს. უმნიშვნელო პლატინირება, რომელიც ვიზუალურად განისაზღვრება როგორც პლატინის ზედაპირის მცირე დაბურვა, ამცირებს პოლარიზაციული ცდომილებების სიდიდეს 60-70-ჯერ. შემდგომი გაზრდა პლატინირებისა, უკვე იწვევს ბამბისმაგვარ დანალექს, რომელიც ცუდად კავდება ელექტროდის ზედაპირზე.

ცხრილი 13. დამოკიდებულება პოლარიზაციულ წინაღობასა და პლატინირების ხარისხს შორის

სისწორე, ჰც	პლატინირების ხარისხი, კ/სმ ²						
	0	0,42	0,84	1,7	6,0	12,6	63
	ცდომილების სიდიდე ΔRs, ომი						
1000	4,285	0,064	0,028	0,016	0,005	0,005	0,007
2010	3,012	0,046	0,020	0,011	0,004	0,004	0,005
3070	2,425	0,039	0,017	0,009	0,003	0,003	0,004

არსებობს ზედაპირის პლატინირების უარყოფითი მხარეები: გარდა იმისა, რომ ელექტროგამტარობის გაზომვისას, საკმაოდ სუფთა ხსნარებშიც კი, ღრეჩოები ივსება ჭუჭყით, რომელთა გარეცხვაც რთულია და ამახინჯებს გაზომვის შედეგებს. ასევე არ შეიძლება პლატინირება იქ, სადაც არსებობს საფრთხე იმისა რომ, პლატინის მინანქარი მოახდენს ხსნარში არასასურველი რეაქციების კატალიზირებას. ამიტომაც, პლატინირების ხსნარის შერჩევას აუცილებელია ვიცოდეთ ის ხსნარები და ნივთიერებები, რომელთანაც იმუშავენს მოწყობილობა.

მიმყვანი გამტარების ტევადობის გავლენის შემცირების მიზნით, ზრდიან გამომყვან ელექტროდებს შორის მანძილს, ანდა იყენებენ გამომყვანების და საკვლევი ხსნარის საზომი მოცულობის ეკვიპოტენციალურ დაცვას [16].

1.3.1. კონტაქტური გადამწოდების თავისებურებები

კონტაქტური კონდუქტომეტრია იკავებს გაზომვათა საკმაოდ ფართო დიაპაზონს 10^{-6} - 150 სიმ/მ, თუმცა ერთ უჯრედს არ შეუძლია დაიკავოს გაზომვების მთელი დიაპაზონი მუდმივი ცდომილების შენარჩუნებით, ამიტომაც ამზადებენ ერთ უჯრედს, განსაზღვრული დიაპაზონის კუთრი ელექტროგამტარებლობისათვის, ან, ამზადებენ პირველად საზომ გარდამქმნელებს, რომლებიც შეიცავენ ორ უჯრედს, სუსტი და კარგად გამტარი ხსნარების კუთრი ელექტროგამტარებლობის გაზომვისათვის. ნახ.1.5-ზე გამოსახულია КЛ—С—1 ტიპის კონდუქტომეტრი.

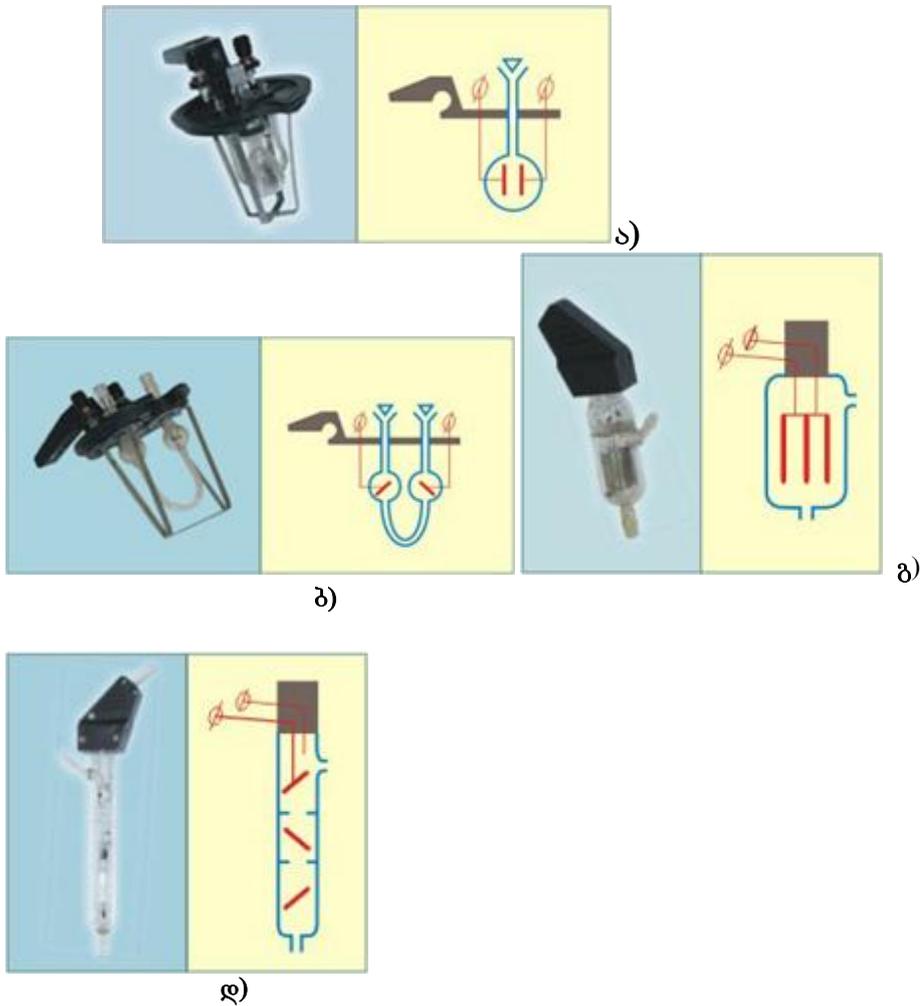


ნახ. 1.5. КЛ—С—1 ტიპის კონდუქტომეტრი.

ნახ.1.6-ზე წარმოდგენილია КЛ—С—1 ტიპის კონდუქტომეტრის გადამწოდების (უჯრედების) კომპლექტი შესაბამისი ეკვივალენტური სქემით. უჯრედის კონსტრუქცია და მასალა, რომლიდანაც ისინი არიან დამზადებული აბსოლუტურად მდგრადი არიან აგრესიული თხევადი გარემოს მიმართ, რაც იძლევა საშუალებას გამოკვლეული იქნეს პრაქტიკულად ნებისმიერი ხსნარი.

ნახ.1.6.ა,ბ-ზე – წარმოდგენილია ჩასახმელი ტიპის კონდუქტომეტრული უჯრედები. ნახ.1.6.ა-ზე წარმოდგენილი A ტიპის უჯრედის გაზომვის დიაპაზონია 10^{-6} - 10^{-1} სიმ/სმ; ნახ.1.6.ბ-ზე წარმოდგენილი B ტიპის უჯრედის გაზომვის დიაპაზონია 10^{-2} - 100 სიმ/სმ; ნახ.1.6.გ,დ-ზე წარმოდგენილია გამდინარე ტიპის კონდუქტომეტრული უჯრედები. ნახ.1.6.გ-ზე წარმოდგენილი C ტიპის უჯრედის გაზომვის დიაპაზონია 10^{-6} - 10^{-1} სიმ/სმ, ხოლო ნახ.1.6.დ-ზე

წარმოდგენილი D ტიპის უჯრედის გაზომვის დიაპაზონია 10^{-2} -100 სიმ/სმ.



ნახ.1.6 .KLI—C—1 ტიპის კონდუქტომეტრის უჯრედების კომპლექტი: ა- Aტიპის; ბ- B ტიპის; გ- C ტიპის; დ- Dტიპის.

მცირე კუთრი ელექტრული გამტარებლობის გაზომვისათვის გამოყენებულ უჯრედებს გააჩნიათ ელექტროდებს შორის მცირე მანძილი და ელექტროდების დიდი ზედაპირი, ამიტომ ყველაზე გავრცელებულ ელექტროდებს ფირფიტების, რგოლების და სპირალების სახით ამზადებენ. უჯრედებს, კარგად გამტარი ხსნარების ელექტროგამტარებლობის გასაზომად, ამზადებენ გაწევილს და კონტაქტის გაცილებით მცირე ზედაპირით. ასეთი უჯრედების ელექტროდებს გააჩნიათ ტაბლეტების ან რგოლების ფორმა.

კონტაქტურ ელექტრომეტრიაში სასურველია ყოველი გაზომვის შემდეგ, ელექტროდები საგულდაგულოდ გაირეცხოს, ამიტომ უჯრედის კონსტრუქცია უნდა იყოს კარგად “ამორეცხვადი”.

1.3.2 კონტაქტური გადამწოდების გამოყენების არეები

კონტაქტურმა კონდუქტომეტრიამ სიზუსტის წყალობით მიიღო ფართო გამოყენება წყლის, ასევე ხსნარების შემადგენლობის კონტროლისათვის, მრეწველობასა და სამეცნიერო კვლევებში. აბსოლუტურად სუფთა წყალს, 25C ტემპერატურაზე და ატმოსფერული წნევისას, უნდა ჰქონდეს კუთრი ელექტრული გამტარობა დაახლოებით 10^{-6} სიმ/მ. მთელ რიგ სამრეწველო დარგებსა და წარმოებებში არსებობს მოთხოვნა წყლის სისუფთავეზე. წყალი გამოიყენება თბოელექტროსადგურებში, გადის რა იონის გარდამქნელ პუნქტებს და გააჩნია კუთრი ელექტროგამტარობა $2 \cdot 10^{-5}$ სიმ/მ საზღვრებში. ყველაზე სუფთა წყალი წარმოებებში გამოიყენება რეაქტორების გაციებისათვის ატომურ ელექტროსადგურებში, კუთრი ელექტროგამტარობით $\chi = 10^{-5}$ სიმ/მ, 25 C ტემპერატურაზე. იაპონიაში ნახევარგამტარების წარმოებისას, გამოიყენება წყალი $\chi = (1-2)10^{-5}$ სიმ/მ კუთრი ელექტროგამტარობით 25 C, კონდენსატორების წარმოებისას კი $\chi = 10^{-4}$ სიმ/მ ამავე ტემპერატურაზე.

კინესკოპების დამამზადებელ ქარხნებში, ელექტრონულ-სხივური მილაკით, გამოიყენება წყალი $\chi = 2,5 \cdot 10^{-5}$ სიმ/მ, 25 C ტემპერატურაზე. კონტაქტური კონდუქტომეტრული უჯრედები აქტიურად გამოიყენება ეკოლოგიური მონიტორინგისათვის და საყოფაცხოვრებო და სამრეწველო გამდინარე წყლების მარილშემცველობის კონტროლისათვის, სადაც კუთრი ელექტროგამტარობა იცვლება საზღვრებში $10^{-3} - 10$ სიმ/მ.

1.4. ტევადური კონდუქტომეტრული გადამწოდები

ტევადური უჯრედი წარმოადგენს დიელექტრიკული ნივთიერების ჭურჭელს, რომელსაც გააჩნია ორი გარე ლითონის ელექტროდი. ელექტროდების ფორმა შეიძლება იყოს მართკუთხა, მრგვალი ან რგოლური. ჭურჭელი სავსეა საკვლევი ნივთიერებით. ტევადური კონდუქტომეტრული გადამწოდის ერთერთ სახე მოცემულია ნახ.1.7-ზე.

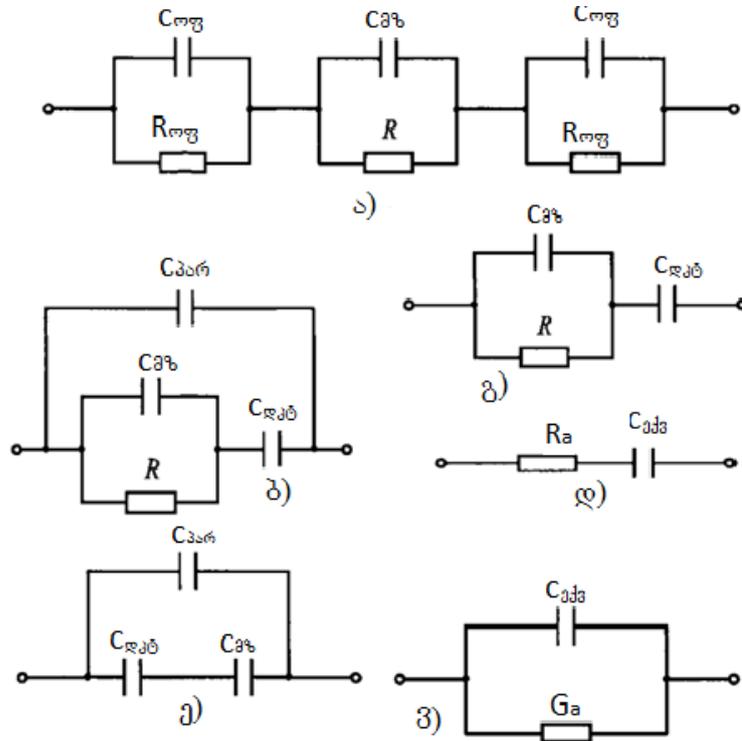


ნახ.1.7. კონდუქტომეტრული გადამწოდის ერთ-ერთი სახე

ტევადური კონდუქტომეტრული გადამწოდის ელექტროდები შეერთებულია ცვლადი ძაბვის წყაროსთან. გადამწოდი წარმოადგენს კონდენსატორს, რომლის ტევადობა განისაზღვრება კუთრი ელექტრული გამტარებლობით და საკვლევი ნივთიერების დიელექტრიკული შეღწევადობით, ასევე შემონაფენების ურთიერთგანლაგებით და გეომეტრიული ზომებით. ამრიგად, ტევადობის მიხედვით შეიძლება განვსაზღვროთ კონტროლირებადი სიდიდის მნიშვნელობა, თუ გამოვაავლენთ ექსპერიმენტული ან გამოთვლითი გზით, ამ სიდიდესა და კონდენსატორის პარამეტრებს შორის ურთიერთკავშირს.

განვიხილოთ ტევადობითი უჯრედი უფრო დაწვრილებით. ის წარმოადგენს სამ კონდენსატორს. პირველი ორი **C**_{დებ} (დიელექტრიკული კედლის ტევადობა), წარმოქმნილია ლითონის ელექტროდებით და ასრულებენ კონდენსატორის შემონაფენების როლს. შიდა შემონაფენი შექმნილია ელექტროლიტით, ხოლო ჭურჭლის კედლები შემონაფენებს შორის ასრულებენ დიელექტრიკის როლს. მესამე კონდენსატორი წარმოქმნილია მხოლოდ შიგა შემონაფენებით,

რომელთა დიელექტრიკს წარმოადგენს საკვლევი ნივთიერება, იგი შუნტირებულია R წინაღობით, რომელიც შეიძლება ჩავთვალოთ $C_{საზ}$ კონდენსატორის გაუონვის წინააღმდეგობად.



ნახ.1.8. ტევადური კონდუქტომეტრული უჯრედების ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემები: R –ხსნარიანი გადამწოდის ომური წინააღმდეგობა; $C_{ფ}$ –მზომი ტევადობა; $C_{დეტ}$ –უჯრედის დიელექტრიკული კედლის ტევადობა; $C_{ოფ}$ –ორმაგი ელექტრული ფენის ტევადობა; $R_{ოფ}$ –ორმაგი ელექტრული ფენის წინააღმდეგობა; $C_{პარ}$ –პარაზიტული ტევადობა; $C_{ეკვ}$ –ეკვივალენტური ტევადობა; G_a, R_a –ნამდვილი გამტარებლობა და წინააღმდეგობა.

ტევადობითი გადამწოდების შესახებ მრავალი ნაშრომი დაწერილია, მაგრამ ანალიზის შედეგად ამორჩეულ იქნენ შედარებით გავრცელებული ჩანაცვლების ეკვივალენტური სქემები, რომლებიც წარმოდგენილი არიან ნახ.1.8-ზე. ამათგან უფრო გავრცელებულია ნახ.1.8.გ-ზე მოცემული ჩანაცვლების სქემა, რომელშიც ორი ტევადობა $C_{დეტ}$, ერთის სახითაა წარმოდგენილი, მაგრამ ზომით ორჯერ მცირეა. $C_{დეტ}$ კონდენსატორის გაუონვის წინააღმდეგობა, როგორც წესი საკმაოდ მაღალია და არ არის დამოკიდებული საკვლევი ხსნარის თვისებებზე, ამიტომ მას ჩვეულებრივ უგულებელყოფენ.

$C_{დკტ}$ განსაზღვრა შეიძლება ნივთიერების დიელექტრიკული შეღწევადობის მიხედვით, რომლითაც დამზადებულია უჯრედი, ასევე მისი კედლების სისქისა და გარე ელექტროდების ზომების მიხედვით:

$$C_{დკტ} = \frac{\epsilon_1}{d} S \quad (1.5)$$

სადაც, ϵ_1 — ნივთიერების დიელექტრიკული მუდმივაა, d —უჯრედის კედლების სისქე, $C_{დკტ}$ —გადამწოდის დიელექტრიკული კედლის ტევადობა, S —ელექტროდების ფართობი.

$$C_{ვებ} = \frac{\epsilon_{გას}}{\Delta} \epsilon_0 S \quad (1.6)$$

სადაც, ϵ_0 — ვაკუუმის დიელექტრიკული მუდმივაა, Δ — შემონაფენებს შორის მანძილი, $\epsilon_{გას}$ —საკვლევი ნივთიერების დიელექტრიკული მუდმივაა.

მოცემული უჯრედისათვის სრული წინაღობა, მუდმივი ძაბვის კვების დროს, მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$Z = \frac{R - j[\omega R^2 C_{გასაზ} (\frac{C_{გასაზ}}{C_{დკტ}} + 1) + \frac{1}{\omega C_{დკტ}}]}{1 + \omega^2 R^2 C_{გასაზ}^2} \quad (1.7)$$

ტევადობითი გადამწოდის ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემის გამარტივებული მოდელი შეიძლება წარმოვიდგინოთ ტევადობების მიმდევრობის შეერთების სახით (ნახ.1.8დ). $C_{გვვ}$ — ეკვივალენტურ ტევადობასა და $R_{აქ}$ —აქტიურ წინაღობას შორის, როცა გადამწოდი მუდმივი დენით იკვებება და პარალელური შეერთების სახით (ნახ.1.8ე)—აქტიურ G_a გამტარობასა და ეკვივალენტურ ტევადობას შორის, როცა გადამწოდი მუდმივი ძაბვით იკვებება [2,14,15]

ტევადობით გადამწოდებს გააჩნიათ მთელი რიგი ღირსებანი; მათ შორის აღსანიშნავია:

- მაღალი მგრძობიარობა უზრუნველყოფილია გადამწოდის პარამეტრების შერჩევით, რომლებიც საშუალებას იძლევიან მივიღოთ ტევადობის მნიშვნელოვანი ცვლილებები, კონტროლირებადი სიდიდის მოცემული ცვლილებისას;

- მცირე მასა და მცირე გაბარიტები მიიღწევა განხილვადი გადამწოდების კონსტრუქციის სიმარტივით;
 - მცირე ინერტულობა, სწრაფად ცვალებადი პროცესების მნიშვნელოვანი ღირსება მიიღწევა ტევადობითი გადამწოდების მაღალი სიხშირის დენის კეებით;
 - კონდენსატორის შემონაფენებს შორის ელექტრული ურთიერთქმედების მცირე ძალა, საშუალებას გვაძლევს გამოვიყენოთ ტევადობითი გადამწოდები მცირე სიმძლავრის მექანიზმების დეტალების გადანაცვლების კონტროლისათვის.
- ეს რაც შეეხება ღირსებებს ამგვარი ტიპის გადამწოდებისა.

თუმცა, გარდა ღირსებებისა მათ გააჩნიათ ნაკლოვანებებიც:

- ტევადობითი გადამწოდების მახასიათებლების არამუდმივობა, მათი მუშაობის პირობების მნიშვნელოვანი ცვლილებებისას (ტემპერატურა, გარემოს ტენიანობა, წნევა და სხვ.);
- შედარებით რთული საზომი სქემების გამოყენების აუცილებლობა;
- გადამწოდის ზოგიერთი დეტალის დამზადება მოითხოვს სპეციალური შენადნობებისა და ნივთიერების მაღალ სიზუსტეს, რაც ქმნის დამატებით სირთულეებს სამეწარმეო პროცესში.

1.4.1. ტევადობითი გადამწოდების თავისებურებანი

C უჯრედის კონსტრუქციისას, მთავარ ყურადღებას უთმობენ C_{გასაზ.} ტევადობას, რადგანაც პირველადი საზომი გარდამქმნელის მგრძობიარობა პროპორციულია ამ ტევადობის სიდიდისა. C_{გასაზომი} ტევადობის გაზრდა შეიძლება ელექტროდების ფართობის ხარჯზე, ასევე ჭურჭლის შემადგენელი ნივთიერების დიელექტრიკული შეღწევადობის გაზრდის და ჭურჭლის კედლების სისქის შემცირების ხარჯზე. ჭურჭლის ნივთიერებად ჩვეულებრივ მიღებულია მინა, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობა 5-7 –მდეა. გაზომვის მგრძობიარობის გაზრდა ასევე შესაძლებელია კერამიკული ჭურჭლის გამოყენებით, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობა

აღწევს 100. თუმცა, კერამიკის გამოყენება დაკავშირებულია სასურველი ფორმის ჭურჭლის დამზადების სიძნელესთან.

ელექტროდებისათვის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ნებისმიერი ლითონი: სპილენძი, თითბერი, ალუმინი ან ვერცხლი. ნივთიერების სისქეს მნიშვნელობა არა აქვს. თუკი გაზომვის პროცესში არ მოითხოვება ელექტროდების გადაადგილება, მაშინ შეიძლება გამოვიყენოთ ფოლგისაგან დამზადებული ელექტროდები, რომელთა დამაგრება წებოს მეშვეობით ხდება. კერამიკულ ჭურჭელზე ელექტროდები (მაგ. ვერცხლის), ჩვეულებრივ ელექტროლიტურად მოირიყება თხელი ფენის სახით. გაზომვის სტაბილური შედეგების მისაღწევად, ელექტროდებმა მჭიდროდ უნდა მოიცვან ჭურჭელი, რათა არ დარჩეს ჰაერის ნაპრალი მომიჯნავე ზედაპირებს შორის.

გადამწოდების კვება, რომელთაც გააჩნიათ მცირე ტევადობა, ხორციელდება მაღალი სიხშირის ძაბვის წყაროებიდან. ეს გამოწვეულია იმით, რომ მხოლოდ მაღალი სიხშირის დენების გადამწოდების კვებისათვის გამოყენებისას, რეალიზდება მათი მაღალი მგრძობიარობა და უზრუნველყოფილია მათთან დაკავშირებული საზომი სქემების სტაბილური მუშაობა.

ტევადობითი გადამწოდების დაბალი სიხშირის დენებით კვებისას, მათი შიდა წინაღობა საკმაოდ მაღალი ხდება, ამიტომაც საკმარისი მგრძობიარობის უზრუნველყოფისათვის და გაზომვების სტაბილურობისთვის, გადამწოდის ელემენტების იზოლაციის და მზომი სქემების შესავალი წრედების წინაღობა უნდა იყოს საკმარისად დიდი. იზოლაციის ასეთი წინაღობის უზრუნველყოფა სპეციალური ღონისძიებების გარეშე საკმაოდ რთულია, იმდენად რამდენადაც, ამ წინაღობის სიდიდეზე გავლენას ახდენს იზოლაციის წინაღობის ცვლილება, გარემო პირობების ტემპერატურისა და ტენიანობის ცვლილებისას, ქსელური წრედების ნათურების წინაღობათა არამუდმივობა და სხვ.

ტევადობითი გადამწოდების მკვებავი დენის სიხშირის გაზრდა, ზოგიერთ შემთხვევებში იმიტომ არის მიღებული, რომ სწრაფად მიმდინარე პროცესების გაზომვისათვის აუცილებელია

განგახორციელოთ მატარებელი სიხშირის მოდულაცია, ე.ი. სიხშირისა, რომელიც კვებას დენის გადამწოდს.

ტევადობითი გადამწოდების კვების ძაბვის სიდიდის შერჩევისას, აუცილებელია გავითვალისწინოთ საჰაერო შუალედის ან დიელექტრიკის გატარობა, რომელიც იმყოფება მის ელექტროდებს შორის. საჰაერო შუალედისთვის, როგორც ექსპერიმენტი გვიჩვენებს, არ ეგების გამოვიყენოთ ელექტრული დაძაბულობა 10^3 ვ/მმ-ზე მეტი. შემონაფენებს შორის დიელექტრიკის არსებობისას, მაგ. ქარსისა, ეს დაძაბულობა შეიძლება გავზარდოთ რამდენჯერმე.

გადამწოდის ელექტროდებს შორის დიელექტრიკის შემონაფენი არა მარტო ამცირებს გატარების შესაძლებლობას, არამედ ზრდის კიდევაც გადამწოდის ტევადობის ფარდობით ცვლილებას ჭრილის ერთსა და იმავე ცვლილებისას მის ელექტროდებს შორის ან, ამ ელექტროდების მოქმედი ფართობის ცვლილებისას.

ტევადობითი გადამწოდების მახასიათებლები გარემო პირობების მცირედი ცვლილებისას, საკმაოდ სტაბილური არიან. თუმცა, თუკი ეს პირობები მნიშვნელოვნად იცვლებიან, მათი მახასიათებლების სტაბილურობა არსებითად ეცემა გარემო ტემპერატურის ცვლილებისას, 20-30 C შუალედში, გადამწოდების ტევადობითი მახასიათებლები ბევრ შემთხვევაში შეიძლება ჩავთვალოთ უცვლელად. ტემპერატურის დიდ საზღვრებში ცვლილებისას არ შეიძლება არ ჩავთვალოთ მათი გავლენა, იმდენად რამდენადაც, გადამწოდის ელექტროდებს შორის ჭრილის ცვლილებამ, ასევე მისი დიელექტრიკების, ან ნივთიერების კონტროლირებადი ნაკეთობის დიელექტრიკული შეღწევადობის ცვლილებამ შეიძლება არსობრივად დაამახინჯოს გაზომვის შედეგები.

ცდომილებების გამორიცხვისათვის, რომლებიც დაკავშირებული არიან გარემო პირობების ტემპერატურის ცვლილებასთან, გადამწოდის დეტალებს ამზადებენ ინვარისაგან (შენადნობი, ხაზობრივი გაფართოების მცირე კოეფიციენტით), ან იყენებენ სხვადასხვა მეტალების დეტალებს ისეთი შერჩევა-შეხამებით, რომ შემონაფენებს შორის უბანზე, ნულის ტოლი იყოს გაფართოების საერთო ეკვივალენტური ტემპერატურული კოეფიციენტი. ეს კოეფიციენტი შეიძლება გამოთვლილ იქნას გადამწოდის დეტალების ზომების

მიხედვით და მათი შემადგენელი ნივთიერებების ხაზობრივი გაფართოების კოეფიციენტით.

გაზომვების მაღალი სიზუსტის უზრუნველყოფისათვის, ტევადობითი გადამწოდების დახმარებით, აუცილებელია გამოვრიცხოთ შესაძლებლობა ელექტროდებს შორის ტენის, ზეთის და სხვა ნივთიერებების მოხვედრისა. ასევე აუცილებელია, რომ ნაკეთობის ზედაპირზე, რომელთა დიელექტრიკულ პარამეტრებს აკონტროლებენ ტევადობითი გადამწოდების საშუალებით, არ იყოს გაზომვის შედეგების დამამახინჯებელი გამტარები ან დიელექტრიკები.

ბევრ შემთხვევაში, ტევადობით გადამწოდებს ამზადებენ ჰერმეტიკულად მოწყობილს, რაც გამორიცხავს შემონაფენებს შორის რაიმე ნივთიერების მოხვედრას, რომელიც გავლენას ახდენს გაზომვის შედეგებზე.

1.4.2. ტევადობითი გადამწოდების გამოყენების დარგები

თავისი ღირსებების წყალობით, ტევადობითმა გადამწოდებმა საზომი ტექნიკის მრავალ დარგში ჰპოვა გამოყენება. გამოვყოთ მათგან მთავარი; ხშირად განხილული გადამწოდები გამოიყენება სხვადასხვა არაელექტრული სიდიდეების კონტროლისათვის. შეიძლება გამოვყოთ მათი გამოყენების ორი ძირითადი მეთოდი:

1. ფართობის ცვლილება, ან შემონაფენების ჭრილის მუშა ფართობის ცვლილება, რომელიც ხორციელდება კონტროლირებადი არაელექტრული სიდიდის გარდაქმნით ტევადობად. ამ მეთოდს იყენებენ:

- მილგამტარში წნევის გასაზომად;
- ვიბრაციის განსაზღვრისათვის;
- ლილვების დიამეტრის კონტროლისათვის მისი გახეხვისას;
- ლილვაკების ძალის გაზომვისას გაგლინულ მეტალზე;
- ზეთოვანი აპკის სისქის გაზომვისას საკისარებზე და სხვ.

2. დიელექტრიკის დიელექტრიკული შეღწევადობის ცვლილება. მას იყენებენ:

- დიელექტრიკული ლენტის სისქის გაზომვისას;

- ავზში სითხის დონის გაზომვისას;
- ფანტავადი ნივთიერებების ტენიანობის განსაზღვრისას;
- მაღალსიხშირული ტიტრირებისას;
- ქაღალდის ტენიანობის განსაზღვრისას.

1.5. ინდუქციური კონდუქტომეტრული გადამწოდები

ინდუქციური უჯრედი წარმოადგენს ინდუქციურობის კოჭას, დახვეულს ჭურჭელზე, რომელიც დიელექტრიკული ნივთიერებისაა. თუკი კოჭას ახლოს, რომელიც იკვებება ცვლადი ძაბვით, იმყოფება გამტარი სხეული, მაშინ ცვლადი მაგნიტური ველის ზემოქმედებით, საკვლევი გარემოში აღიძვრებიან გრიგალური დენები, რომლებიც ცვლიან გრაგნილის ელექტრულ პარამეტრებს. ელექტრული პარამეტრების ცვლილება დამოკიდებულია ხსნარის ელექტროგამტარებლობაზე, დენის სიდიდეები და სიხშირეები კოჭაში — გეომეტრიულ ზომებზე და გამტარი სხეულისა და გრაგნილის მდებარეობის თანაფარდობაზე [2,3,5,17]. ნახ. 19-ზე წარმოდგენილია ინდუქციური გადამწოდის ერთ-ერთი სახე.

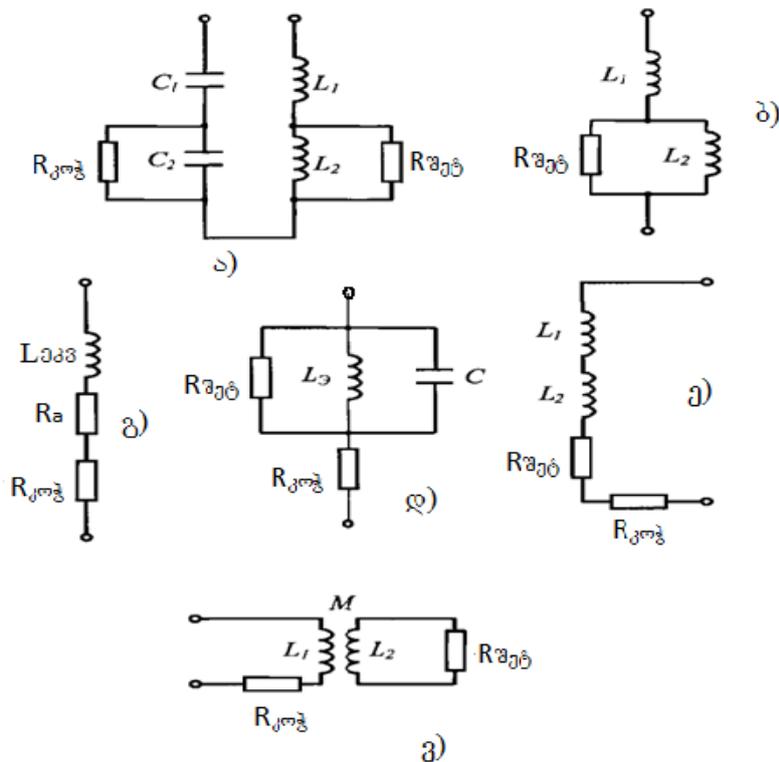


ნახ.19. ინდუქციური გადამწოდის ერთ-ერთი სახე.

გრიგალური დენების ველი ცვლის კოჭას აქტიურ და რეაქტიულ წინაღობას. აქტიური წინაღობის ცვლილება განპირობებულია დანაკარგების ზრდით, იმ ენერგიის დანაკარგის ხარჯზე, რომელიც გრიგალური დენების შენარჩუნებისთვისაა, ხოლო რეაქტიული წინაღობის ცვლილება დაკავშირებულია იმასთან, რომ გრიგალური დენების მაგნიტური ველი მიმართულია კოჭას ველის საწინააღმდეგოდ. ეს ცვლილებები ვაკუუმთან მიმართებაში სახელდება შეტანილ აქტიურ და რეაქტიულ წინაღობებად. ისინი დამოკიდებულნი არიან საკვლევი ხსნარის სიხშირეზე, ელექტროგამტარებლობაზე და მაგნიტურ შეღწევადობაზე [12].

კოჭას გრაგნილში, აქტიურ და რეაქტიულ მდგენელებში მიმდინარე ცვლილებების მეშვეობით, შეიძლება გაზომილ იქნას კონტროლირებად გამტარ სხეულებში მრავალრიცხოვანი სხვადასხვა არაელექტრული სიდიდეები.

ინდუქციური გადამწოდის ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემები, რომლებიც წარმოდგენილია ნახ.1.10 –ზე საშუალებას გვაძლევენ გამოვთვალოთ გადამწოდის სრული კომპლექსური წინაღობა და მისი მდგენელები, ჩავატაროთ გადამწოდის თავისებურებათა ანალიზი, განვსაზღვროთ მისი სტატიკური მახასიათებლები, გამოსავალი პარამეტრები და გამოვთვალოთ გადამწოდის როგორც მეტროლოგიური თავისებურებანი, ასევე მთლიანად მოწყობილობაც [4]. გადამწოდის ეკვივალენტური სქემის სწორად შედგენისას, გამოთვლილი სტატიკური მახასიათებელი, მისი განსაკუთრებული წერტილები, უნდა ემთხვეოდეს ექსპერიმენტალურად მიღებულ მრუდს [18].



ნახ.1.10 ინდუქციური კონდუქტომეტრული უჯრედების ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემები.: L_1 -კოჭას ინდუქციურობა ცარიელი უჯრედით; L_2 -საკვლევი ხსნარის მიერ შეტანილი ინდუქციურობა; $R_შ$ -საკვლევი ხსნარის მიერ შეტანილი წინაღობა; $R_{კოჭ}$ -კოჭას გამტარის ომური წინაღობა; -ურთიერთინდუქცია; $R_ა$ -ნამდვილი წინაღობა; $L_{კოჭ}$ - ეკვივალენტური კოჭა; C -

უჯრედის საერთო ტევადობა ,რომელიც შედგება C_1 და C_2 -გან; C_1 -კოჭას ტევადობა; C_2 -უჯრედის ჭურჭლის კედლების ტევადობა;

ლიტერატურაში [2,4,12] ხშირად გვხვდება ე.წ. “უკავშირო” სქემა (ნახ.1.10ბ). მიმდევრობით შეერთებული ჩანაცვლების სქემების სხვადასხვა ვარიანტები (ნახ.1.10 გ,დ) და ტრანსფორმატორული სქემა (ნახ.1.10 ვ), მაგრამ გამოთვლებისას, მოცემული სქემა იწვევს მთელ რიგ სირთულეებს, კერძოდ, ინდუქტივობებს შორის კავშირის კოეფიციენტის გამოანგარიშებაში.

კომბინირებული ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემა წარმოდგენილი ნახ.1.10ა-ზე და ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემა წარმოდგენილი ნახ.1.10დ-ზე, ექსპერიმენტული შემოწმების სირთულის გამო, მოცემული სქემების ადეკვატურობის შეფასება ანდა მოძებნა ამ სქემების მიხედვით დაპროექტებული მოწყობილობებისა, არ მოხერხდა.

ამა თუ იმ ხარისხით, თითოეული ეკვივალენტური სქემა გამოსახავს რეალურ პროცესებს, რომლებიც მიმდინარეობს ინდუქციურ გადამწოდში. მეტ-ნაკლებად გავრცელებული მათ შორის არის ნახ. 1.10.ე-ზე. გამოსახული ტრანსფორმატორული სქემა. ცალკე გამოყოფის ღირსია ინდუქციური კონდუქტომეტრები ტრანსფორმატორული პირველადი საზომი გარდამქმნელებით, რომლებიც უფრო და უფრო ხშირად გამოიყენება ქიმიურ, ნავთობქიმიურ, გაზისა და სხვადასხვა მრეწველობაში.

ტრანსფორმატორული ჩანაცვლების ეკვივალენტური ელექტრული სქემის ინდუქციური უჯრედის სრულ წინაღობას აქვს სახე:

$$Z = R_{კოჭ} + \omega^2 M^2 \frac{R_{შეტ}}{R_{შეტ}^2 + \omega^2 L_2^2} + j \left(\omega L_1 - \omega^2 M^2 \frac{\omega L_2}{R_{შეტ}^2 + \omega^2 L_2^2} \right)^2 \quad (18)$$

ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ მსგავსი პირველადი საზომი გარდამსახები მოსახერხებელი არიან ნივთიერების უწყვეტ ნაკადში გამოსაყენებლად, ისინი საიმედონი არიან, მათი კონსტრუქცია მარტივია, გამოიყენებიან ბლანტ და აგრესიულ გარემოთა ანალიზისათვის. მიუხედავად ინდუქციური მეთოდის პოპულარობისა, როგორც ინდუქტივობის სახესხვაობა, მაინც ეს მეთოდი სუსტად ვითარდება. ლიტერატურულ წყაროებში არ არსებობს მონაცემები

ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების საბაზო სქემებისა, მათი სახესხვაობებისა, ღირსებებისა და ნაკლოვანებებისა, მრეწველობაში მათი გამოყენებისა; არ არის შექმნილი მათემატიკური მოდელები სტატიკური მახასიათებლებისა, მგრძობიარობებისა და ცდომილებებისა, არ არის ჩატარებული სტრუქტურული და პარამეტრული ოპტიმიზაცია. ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე კარგად ჩანს, რომ უკონტაქტო ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრული ანალიზატორის შემუშავებისათვის, აუცილებელია შევქმნათ მათემატიკური მოდელები ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების საბაზო სქემებისათვის, ამ მოდელების საფუძველზე მივიღოთ სტატიკური მახასიათებლების მგრძობიარობებისა და ცდომილებების მათემატიკური მოდელები; ჩავატაროთ ამ სქემებისათვის შედარებითი ანალიზი და პარამეტრული ოპტიმიზაცია, რის მიხედვითაც ამოვარჩიოთ მოწყობილობების რეალიზაციისათვის შედარებით შესაფერისი სქემა.

გარდა იმ ჩამოთვლილი ღირსებებისა, რომლებიც გააჩნია არაკონტაქტურ მეთოდებს, ერთ-ერთი უპირატესობა ინდუქციური გადამწოდების მდგომარეობს მათ შესაძლებლობაში, შეცვალოს სისწორე, გაზარდოს მგრძობიარობა კონტროლირებადი სიდიდისკენ და შეამციროს გავლენა არაინფორმაციული სიდიდეებისა, რომლებსაც შეაქვთ ცდომილება გაზომვის შედეგებში.

ინდუცირებული გადამწოდების გამოყენებას აფერხებს ძირითადად ის, რომ ელექტროგამტარებლობის გაზომვის დიაპაზონი იცვლება საზღვრებში— 10^3 – 10^2 სიმ/ს და ზემოთ. ე.ი. ისინი გამოიყენებიან კარგად გამტარი ნივთიერებების კონტროლისათვის—მარილხსნარებში და ელექტროლიტებში. კიდევ ერთი არსებითი ნაკლი—ცდომილებები, რომლებიც დაკავშირებული არიან გარემოს ტემპერატურის ცვლილებასთან.

1.5.1. ინდუქციური გადამწოდების თავისებურებანი

უჯრედის შექმნისათვის, ძირითადი ყურადღება ეთმობა ე.წ. ზედაპირულ ეფექტს, რომლის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ ცვლადი მაგნიტური ველი და მის მიერ გამოწვეული გრიგალური დენები მიილევინან, მოხვდებიან რა გამტარი გარემოს სიღრმეში. ეს მილევვა დაკავშირებულია იმასთან, რომ გრიგალური დენები, განპირობებულნი ცვლადი მაგნიტური ველით, თავის მხრივ ქმნიან მაგნიტურ ველს, მიმართულს მათ მიერ წარმოქმნილი ველის საწინააღმდეგოდ; აღძრული ველის ნაკადებისა და გრიგალური დენების ველის ნაკადების სხვაობა, აღწევს რა გამტარი გარემოს სიღრმეში, მცირდება, შესაბამისად გრიგალური დენების ინტენსივობის შემცირებასთან. ზედაპირული ეფექტი იზრდება ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობის მქონე დენის სისშირის გაზრდით და გამტარი გარემოს კუთრი წინააღმდეგობის შემცირებით. ის ასევე ცვლის უჯრედში საკვლევი ნივთიერების აქტიური წინააღმდეგობის სიდიდეს და მის ინტენსივობას. ანუ, ძალზედ მაღალი სისშირეებისას, მთელი დენი გადის საკვლევი გარემოს ზედაპირზე.

გრიგალური დენების გავრცელების კვლევას საკვლევ გარემოში ან ნივთიერებაში, აქვს დიდი მნიშვნელობა მაღალსისშირული ინდუქციური გადამწოდის შემუშავებისათვის; იმდენად რამდენადაც გრიგალური დენების სწორად განაწილებისას შეიძლება მინიმალური ცდომილებებით განვახორციელოთ აუცილებელი გაზომვები.

თუ ნივთიერება, რომლისგანაც მზადდება გადამწოდი, ან ნაკეთობის ნივთიერება, რომელიც კონტროლირდება გადამწოდის მიერ, ასევე მისი პარამეტრები და გაბარიტები, ჩვეულებრივ ცნობილია, მაშინ დამაკმაყოფილებელი მუშაობის უზრუნველყოფისათვის რჩება ის, რომ ამოვირჩიოთ მკვებავი დენის სათანადო სისშირე.

სისშირის შერჩევასა და შეღწევის სიღრმის გარდა უნდა გავითვალისწინოთ ოპტიმალური მგრძობიარობა, მოწყობილობის სკალის წრფივობა, ვეცადოთ შევამციროთ გადამწოდის გაბარიტები, ასევე სხვადასხვა დაბრკოლებების გავლენა და გარემოს ტემპერატურის ცვლილება.

ინდუქციური გადამწოდების გაბარიტების შემცირებისათვის გამოიყენებენ ფერიტის გულარებს, რომელთაც გააჩნიათ მაღალი მაგნიტური შეღწევადობა. დაბალ სიხშირეებზე გამოიყენებენ სპეციალური ფურცლოვანი ფოლადის გულარებს, რომელთაც ამ სიხშირეებზე გააჩნიათ მაღალი მაგნიტური შეღწევადობა და შედარებით მცირე დანაკარგები. მაღალ სიხშირეებზე ჩვეულებრივ იყენებენ ფერიტებს, რომელთა დანაკარგები მცირეა.

გულარებიანი გადამწოდების სტაბილურობა უგულაროებისაგან განსხვავებით, შეიძლება იყოს არსებითად მცირე, გარემო ტემპერატურის ცვლილებისას, ანდა სხვა მიზეზთა გამო; იმდენად რამდენადაც, მათ შეიძლება შეეცვალოს ფოლადის ან ფერიტების მაგნიტური შეღწევადობა.

1.5.2. ინდუქციური გადამწოდების გამოყენების დარგები

მაღალსიხშირულმა ინდუქციურმა გადამწოდებმა, თავისი სიმარტივისა და საიმედოობის წყალობით, გამოყენება ჰპოვეს მეცნიერებისა და ტექნიკის მრავალ დარგში. განსაკუთრებით კი იქ, სადაც მოითხოვება ტექნოლოგიური პროცესების უკონტაქტო კონტროლი. ინდუქციური გადამწოდები გაცილებით მიზანმიმართულად გამოიყენებიან ისეთი ხსნარების გასაზომად, რომელთაც გააჩნიათ შედარებით მაღალი ელექტროგამტარებლობა, ამიტომ ისინი ფართოდ გამოიყენებიან სხვადასხვა საწარმოო პროცესების კონტროლისათვის, როგორებიცაა მაგალითად:

- ბლანტი და აგრესიული ხსნარებისა და სუსპენზიების კუთრი ელექტრული გამტარებლობის გაზომვისას;
- ბინარული ხსნარების კონცენტრაციის გაზომვისას;
- წარმოებული გამტარების დიამეტრის კონტროლისას;
- ფოლგის სისქის გაზომვისას;
- გაღვანური ნაფენების სისქის კონტროლისას;
- ნაკეთობის ხარისხის კონტროლისა გამტარობის მიხედვით;
- წარმოებული ლითონის დეტალებში ნაპრალების აღმოჩენისათვის.

1.6. კონდუქტომეტრიაში გამოყენებული ძირითადი საზომი სქემების მიმოხილვა

კონდუქტომეტრები, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, შედგებიან ორი ძირითადი მოწყობილობისაგან: უჯრედის პირველადი გადამწოდისაგან და მზომი მოწყობილობისაგან.

კონტაქტური გაზომვის საშუალებების ძიებისას, ფართო გამოყენება ჰპოვეს: ბოგირულმა მეთოდმა, კომპენსაციურმა მეთოდმა, პირდაპირი გაზომვის მეთოდმა, შედარების მეთოდმა. გარდა ამისა, გამოიყენება შემდეგი ტიპების რეზონანსული მზომი სქემები: **Z-მეტრული**, რომელიც რეაგირებს კომპლექსური წინაღობის მოდულის ცვლილებაზე; **Q-მეტრული**, რომელიც რეაგირებს უპირატესად, წინაღობის აქტიური მდგენელის ცვლილებაზე; **F-მეტრული**, რომელიც რეაგირებს წინაღობის რეაქტიული მდგენელის ცვლილებაზე.

1.6.1. ბოგური სქემებით გაზომვის მეთოდი

ბოგური სქემებით გაზომვის მეთოდი რეალიზებულია რამდენიმე ვარიანტად:

- გაწონასწორებული ბოგები;
- გაუწონასწორებელი ბოგები;
- კვაზიგაწონასწორებული ბოგები;
- ნახევრადგაწონასწორებული ბოგები.

გაწონასწორებული ბოგების მუშაობის პრინციპი მდგომარეობს იმაში, რომ გაზომვის შედეგები მიიღება ბოგას წონასწორობის მიღების შემდეგ, რომელიც მიიღწევა ბოგას დიაგონალში ძაბვის არ არსებობის დროს[2,6,19]. რადგან კონდუქტომეტრული უჯრედის წინაღობას გააჩნია როგორც აქტიური, ასევე ტევადური ხასიათი, ამიტომ შედარების მხრებში წონასწორობის მისაღწევად აუცილებელია იცვლებოდეს მინიმუმ ორი სოდიდე, რომელთაგან ერთი ცვლის იმპედანსის აქტიურ მდგენელს, ხოლო მეორე – რეაქტიულს.

მსგავსი ბოგები გამოიყენება როგორც ორელექტროდიანი, ასევე ოთხელექტროდიანი. ამასთანავე კონტაქტურ კონდუქტომეტრიაში ორელექტროდიანი უჯრედების გამოყენებისას არსებითი ცდომილება შეაქვს პოლარიზაციული იმპედანსის აქტიურ მდგენელს.

გაწონასწორებული ბოგების ღირსებად შეიძლება ჩაითვალოს მათი მაღალი სიზუსტე. ამიტომ მათ გამოიყენებენ პრეციზიული კონდუქტომეტრებისა და სანიმუშო მოწყობილობების დამუშავებისა და დამზადების დროს [20, 21].

მათი უარყოფითი მხარეა საკმაოდ რთული კონსტრუქცია [2] და წონასწორობის მდგომარეობის მისაღწევად სჭირდება გარკვეული დრო.

გაუწონასწორებელი ბოგები გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როცა საჭიროა ხელსაწყო კონსტრუქციის გამარტივება და ასევე როცა საჭირო არ არის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების გაწონასწორება [2,8,22].

მსგავსი სქემების უარყოფითი მხარეა ის, რომ მოითხოვება კვების გენერატორის ძაბვის ამპლიტუდისა და სიხშირის სტაბილურობა. გაზომვის შედეგზე გავლენას ახდენს კონდუქტომეტრული უჯრედის იმპედანსის რეაქტიული მდგენელის სიდიდე და ელექტროდების პოლარიზაციის წინააღობის აქტიური მდგენელი.

მათ დადებით მხარედ ითვლება ბოგურ სქემასთან შედარებით მარტივი კონსტრუქცია და არ არის საზომი ბოგას აქტიური და რეაქტიული მდგენელების გაწონასწორების საჭიროება, რის წყალობითაც მცირდება ჩვენების დადგენის დრო [16].

კვაზიგასწორებული ბოგას მუშაობის პრინციპი მდგომარეობს იმაში, რომ ბოგას საზომ დიაგონალში შეირჩევა ძაბვის ფაზური და მოდულური ნაწილების ისეთი თანაფარდობა, რომლის დროსაც მიიღწევა წონასწორობა. მაგრამ ამ დროს ძაბვა ბოგას დიაგონალში ნულის ტოლი არ არის [10,20,23].

ასეთ ბოგებს გააჩნიათ მთელი რიგი დადებითი თვისებები. კერძოდ: გაზომვის შედეგზე გავლენას ვერ ახდენს ძაბვის ამპლიტუდა, მოითხოვება სარეგულირო ელემენტების მცირე რაოდენობა, რაც ამარტივებს ხელსაწყო კონსტრუქციას.

უარყოფითი მხარეებიდან შეიძლება აღინიშნოს შემდეგი: წონასწორობის მაჩვენებლის მოწყობილობის სირთულე მისი მახასიათებლებისა და სტაბილურობის მიმართ მაღალი მოთხოვნების გამო; გაზომვის შედეგი დამოკიდებულია კონდუქტომეტრული უჯრედის იმპედანსის რეაქტიულ მდგენელსა და წონასწორობის დიფერენციალური მაჩვენებლის გამოსავალ წინააღმდეგობაზე [2].

ნახევრადგაწონასწორებული ბოგები წონასწორობის მდგომარეობაში იმყოფებიან, თუ საზომი ბოგას მოსახლვრე მხრებში ძაბვის ამპლიტუდები ტოლია, რომელთა შეერთების წერტილი წარმოადგენს ბოგას კვების დიაგონალის ერთერთ წერტილს.

ნახევრადგაწონასწორებულ ბოგებში წონასწორობის ინდიკატორია დიფერენციალური მაჩვენებელი, რომლის როლს წარმოადგენს ძაბვის ვარდნების საშუალო მნიშვნელობების შედარება, რომელიც ერთ მხარში დამოკიდებულია საზომი გადამწოდის იმპედანსის მოდულზე, ხოლო მეორეში – მარეგულირებელ ელემენტზე [2.8].

ნახევრადგაწონასწორებულ ბოგებში არ არის სარეგულირო კონდენსატორის გამოყენების საჭიროება, რაც ითვლება მის ღირსებად.

უარყოფითი მხარეებიდან შეიძლება აღინიშნოს: ხელსაწყოთა კონსტრუქცია რთულდება წონასწორობის დიფერენციალური მაჩვენებლის გამოყენების გამო. გარდა ამისა მაჩვენებელს უნდა ჰქონდეს სტაბილურობის მაღალი მახასიათებლები [24].

1.6.2 შედარების მეთოდის გამოყენების სქემები

შედარების მეთოდის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ ხდება შედარება გამტარობის, წინააღმდეგობის, დენის ან ძაბვის ვარდნის ცნობილი სიდიდისა, იმ მნიშვნელობასთან, რომელიც მიღებულია პირველადი საზომი გარდამსახით.

შედარება შეიძლება იყოს ერთდროული და განსხვავებული დროით. ერთდროული შედარებისას, ჩვეულებრივ იყენებენ ოპერაციულ გამაძლიერებლებს, რომელთა შესავალ წინააღმდეგობას შეაქვს დამატებითი ცდომილება გაზომვის შედეგებში; გარდა ამისა,

გაზომვის შედეგებზე გავლენას ახდენს კონდუქტომეტრული უჯრედის რეაქტიული მდგენელი.

გაზომვის განსხვავებულ დროითი მეთოდის დროს, ხდება რიგ-რიგობითი გაზომვა არხში, მზომი სიდიდითა და მუშა საზომით. კონდუქტომეტრულ უჯრედსა და მუშა საზომს შორის გამტარებლობის განსხვავების გამო, მოწყობილობის შესავალზე მიეწოდება ამპლიტუდის მიხედვით მოდულირებული ცვლადი ძაბვა. მოდულირებული ძაბვის ამპლიტუდა პროპორციულია კონდუქტომეტრული უჯრედის გამტარებლობისა და მუშა საზომის გამტარებლობის სხვაობისა. ის გარდაიქმნება შედარების მოწყობილობის მეშვეობით მმართველ სიგნალში, მანამ სანამ მოდულაციის ძაბვის ამპლიტუდა არ გაუტოლდება ნულს. სიდიდე, რომლის დროსაც მიიღწევა სისტემის წონასწორობა, არის კონდუქტომეტრული უჯრედის გამტარებლობა.

მსგავსი სქემის ღირსებად მიიჩნევა: გაზომვის შედეგის დამოუკიდებლობა გენერატორის ძაბვის ამპლიტუდაზე; შედარების მოწყობილობის არხების გადაცემის კოეფიციენტების გავლენის არ არსებობა გაზომვის შედეგებზე, მმართველ სიგნალთან ხისტი ფუნქციონალური კავშირის აუცილებლობის არ არსებობა.

ნაკლი მდგომარეობს—მუშა საზომის გამტარებლობის დამატებითი გაზომვის აუცილებლობაში, გაზომვის შედეგების დამოკიდებულება პირველადი საზომი გარდამსახების რეაქტიულ მდგენელებთან [10,16,20].

1.6.3. სქემები გაზომვის კომპენსაციური ხერხის გამოყენებით

კომპენსაციური მეთოდის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ მზომი უჯრედების ელექტროდებზე ძაბვის ვარდნა შემხვედრი ძაბვით კომპენსირდება ნულამდე. სქემაში ძაბვის წყაროდ გამოიყენება გენერატორი. ძაბვის სრული კომპენსაციისათვის აუცილებელია შევცვალოთ ძაბვის ფაზა და ამპლიტუდა, რისთვისაც გამოიყენება ცვლადი ტევადობა და ძაბვის აქტიური

გამყოფი. ნაკლი კომპენსაციური მეთოდისა არის, კონსტრუქციის სირთულე და გაზომვის შედეგებზე პირველადი საზომი გარდამსახების ელექტროდებზე პოლარიზაციული მოვლენების გავლენა [1,8].

1.6.4. სქემები უშუალო შეფასების მეთოდის გამოყენებით

უშუალო შეფასების პრინციპის მიხედვით, სქემური გადაწყვეტილებები რეალიზებულია რამდენიმე ვარიანტად:

- ზომავენ ძაბვის ვარდნას ცნობილ რეზისტორზე, რომელიც მიმდევრობითაა ჩართული ორელექტროდიან პირველად საზომ გარდამქმნელთან, ან ცვლიან ძაბვის ვარდნას პირველად საზომ გარდამქმნელთან, რომელიც მიმდევრობითაა ჩართული ცნობილ რეზისტორთან. მსგავსი სქემების ღირსება მდგომარეობს მათ სიმარტივესა და საიმედოობაში.
- ზომავენ დენს პირველადი საზომი გარდამქმნელის გავლით. რისთვისაც გამოიყენება დენის ძაბვად გარდამქმნელი, რომლის მეშვეობითაც დენის ამპლიტუდით მსჯელობენ საკვლევი ხსნარის გამტარობაზე. სქემაში შედარების რეზისტორის არ არსებობის გამო, მოწყობილობის სკალა სწორსაზოვანია, რაც წარმოადგენს ამ სქემით რეალიზებული კონდუქტომეტრების ძირითად ღირსებას. გარდა ამისა, მას გააჩნია გენერატორის ძაბვის ამპლიტუდაზე მცირე დამოკიდებულება. მსგავსი სქემების ნაკლად შეიძლება ჩაითვალოს ის, რომ გაზომვის შედეგების სიზუსტეზე გავლენას ახდენს საყრდენი ძაბვის სტაბილურობა და გაზომვის არხების დამოკიდებულება გადაცემის კოეფიციენტზე.
- ზომავენ ძაბვის ვარდნას ცნობილ რეზისტორზე, ინარჩუნებენ რა საყრდენი ძაბვის ვარდნას ორელექტროდიან პირველად საზომ გარდამქმნელზე ან ოთხელექტროდიანის პოტენციალურ

ელექტროდებზე. ცვლადი ძაბვის ან დენის მმართველი გენერატორების გამოყენება კონტაქტურ კონდუქტომეტრიაში საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ ორმაგი ელექტრული ფენის ტევადობის გავლენა გაზომვის შედეგზე. ეს მიიღწევა იმის ხარჯზე, რომ ძაბვის ვარდნა რჩება მუდმივი და ტოლი საყრდენი ძაბვისა. აღსანიშნავია, რომ გაზომვის შედეგის დამოკიდებულება საყრდენი ძაბვის სიდიდეზე, წარმოადგენს მოცემული სქემის ნაკლს; გარდა ამისა, შეიძლება აღვნიშნოთ, რომ აუცილებელია შესადარებელი ძაბვების მარეგულირებელი ფაზურმაბრუნებელის გამოყენება.

- კვების ძაბვის სინქრონულად ზომავენ გამართული ძაბვის ვარდნას ორელექტროდიან პირველად საზომ გარდამქმნელზე. სინქრონული მეთოდი რეალიზებულია მიმდევრობით შეერთებული პირველადი საზომი გარდამქმნელისა და აქტიური წინაღობის მიერ, რომელნიც იკვებებიან ცვლადი ძაბვით, ასევე სინქრონულად კვებავს იმ მოწყობილობას, რომელიც უზრუნველყოფს გამართული ძაბვის ვარდნას პირველად საზომ გარდამქმნელზე; მსგავსი სქემის ღირსებად გვევლინება პირველადი საზომი გარდამქმნელის იმპედანსის რეაქტიული მდგენელის გავლენის გამორიცხვა. ნაკლად კი შეიძლება ჩაითვალოს გაზომვის შედეგის დამოკიდებულება კვების ძაბვის ამპლიტუდაზე და მიმდევრობით ჩართული რეზისტორის წინაღობის სიდიდის გავლენა [16, 20].

1.6.5. გაზომვის Z,Q,F– მეტრული მეთოდები

Z–მეტრულ მეთოდში, რომელიც რეაგირებს კომპლექსური წინაღობის მოდულის ცვლილებაზე, ასევე გამოყოფზე, რომელიც შედგება რეზისტორისა და რეზონანსული კონტურისაგან, მაღალსიხშირული ძაბვა მიეწოდება გენერატორიდან ბუფერული და სიმძლავრის გამაძლიერებლის გავლით. კონტურში ჩართულია პირველადი საზომი გარდამქმნელი. სიგნალი მაღალსიხშირული ძაბვის სახით, კონტურზე ძლიერდება, შემდეგ დეტექტირდება და დენის მიხედვით გაძლიერების შემდგომ მიეწოდება გადამთვლელ-რეგისტრირებად მოწყობილობას.

Q–მეტრულ მეთოდში, რომელიც რეაგირებს წინაღობის აქტიური მდგენელის ცვლილებაზე, მაღალსიხშირული ძაბვა მიეწოდება გენერატორიდან გამაძლიერებლის გავლით რეზონანსულ კონტურს, რომელიც ჩართულია პირველად საზომ გარდამქმნელში. პირველადი საზომი გარდამქმნელის კომპლექსური წინაღობის რეაქტიული მდგენელი კი, კომპენსირდება კონტურის რეზონანსში მომართვით. სიგნალი, რომელიც პროპორციულია კონტურის ვარგისიანობის ცვლილებისა, გაძლიერებისა და დეტექტირების შემდეგ მიეწოდება დენის გამაძლიერებელზე და შემდეგ გადამთვლელ-რეგისტრირებად მოწყობილობას.

F–მეტრული მეთოდი რეაგირებს კომპლექსური წინაღობის რეაქტიული მდგენელის ცვლილებაზე. გამოსავალი სიგნალი აღიძვრება ორი მაღალსიხშირული რხევის ბიძგის შედეგად, რომლებიც წარმოიქმნება ცვლადი სიხშირის გენერატორის მიერ და რომლის კონტურშიც ჩართულია მზომი გარდამქმნელი და ფიქსირებული სიხშირის გენერატორი. სიგნალების ეს ერთობლიობა მიეწოდება შემრევზე და მის გამოსავალზე აღიძვრება კომბინაციური მდგენელების სპექტრი, რომელთა შორისაც გვაქვს სასარგებლო სიგნალიც, გამოყოფილი მცირე სიხშირეების ფილტრით. გაძლიერების შემდეგ, ეს სიგნალი მიეწოდება იმპულსურ გარდამქმნელ-შემომსახვერელზე, ხოლო შემდეგ კი—სიხშირმზომზე.

შედგები და განსჯა

თ ა ვ ი II

უკონტაქტო ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების გამოკვლევა და დამუშავება

უკონტაქტო კონდუქტომეტრია თავისი სიმარტივისა და საიმედოობის წყალობით, წარმოადგენს მინარევების, ხსნარებისა და შენადნობების ფიზიკო-ქიმიური თვისებების ანალიზის ერთ-ერთ გაგრძელებულ და უნივერსალურ მეთოდს.

ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრები წარმოადგენენ უკონტაქტო კონდუქტომეტრის ერთ-ერთ სახეს. ისინი ფართოდ გამოიყენება ნავთობქიმიურ, ქიმიურ, ფარმაცევტულ, კვებისა და მრეწველობის დარგებში, როგორც ტექნოლოგიური პარამეტრების ასევე გამოშვებული პროდუქციის ხარისხის მაკონტროლებელი.

მოცემული ხელსაწყოების მოთხოვნილებებზე მეტყველებს ის ფაქტი, რომ ყველა მსხვილ ხელსაწყოთა მშენებლობის ორგანიზაციებს გააჩნიათ თავის ასორტიმენტში ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების სამოდულო რიგი, რომელთა დახვეწა განვითარება კვლავაც გრძელდება. ეს განისაზღვრება იმით, რომ მსგავს ხელსაწყოებს არ გააჩნიათ კონტაქტი საკვლევ ხსნართან, ამიტომაც ისინი შეიძლება იყვნენ დამონტაჟებულნი სხვადასხვა ტექნოლოგიურ დანადგარებში და მიღგამტარებში და შეუძლიათ გაზომონ როგორც ნეიტრალური, ასევე აგრესიული გარემო.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, დღემდე არ ეთმობოდა საკმარისი ყურადღება ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების მზომი სქემების შესადარებელი ანალიზის ამოცანას, თუმცა ბევრი ნაშრომია დაწერილი კონდუქტომეტრებზე ინდუქციური გარდამქმნელებით [1,2,3,6,7,8,21,23,25,26,27], მაგრამ ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრები, როგორც კერძო შემთხვევა უკონტაქტო ინდუქციური კონდუქტომეტრებისა, არ განიხილება.

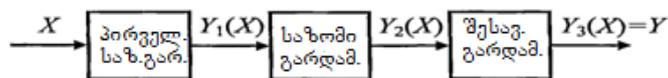
მოცემულ თავში შემუშავებულია ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების არსებული სქემების სტატიკური მახასიათებლები, შექმნილია ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ძირითადი

მზომი სქემების მათემატიკური მოდელები, რომლებიც გამოიყენებენ გაზომვის პირდაპირ და კომპენსაციურ მეთოდს, ჩატარებულია მათი შედარებითი ანალიზი.

2.1 ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების საზომი სქემების სტატისტიკური ანალიზი

კონდუქტომეტრები, ისევე როგორც სხვა ანალიტიკური ხელსაწყოები, წარმოადგენენ გაზომვის საშუალებებს, ე.ი. ტექნიკურ საშუალებას, რომელიც გათვლილია გაზომვებისათვის და გააჩნია ნორმირებული მეტროლოგიური მახასიათებლები. ისინი წარმოქმნიან და ინახავენ ფიზიკური სიდიდის ერთეულს, რომლის ზომას იღებენ უცვლელად (დამყარებული ცდომილების საზღვრებში) ცნობილი დროის ინტერვალის განმავლობაში.

კონდუქტომეტრის სტრუქტურული სქემა მოცემულია ნახ.2.1 - ზე.



ნახ. 2.1 კონდუქტომეტრის სტრუქტურული სქემა

X - შესავალი სიგნალი (კუთრი ელ. გამტარ.გასაზომი სიდიდე)
 Y - გამოსავალი სიგნალი

რადგანაც კონდუქტომეტრი წარმოადგენს გაზომვის საშუალებას, ხოლო გაზომვა ესაა ცდისეული ხერხით ფიზიკური სიდიდის მნიშვნელობის პოვნის პროცესი სპეციალური ტექნიკური საშუალებების დახმარებით, ისევე როგორც გაზომვის სხვა ხერხები, მასაც გააჩნია ცდომილება.

გაზომვის ცდომილებას უწოდებენ გაზომვის შედეგების გადახრას მზომი სიდიდის ნამდვილი მნიშვნელობიდან, ხოლო ΔX – აბსოლუტურ ცდომილებას, რომელიც გამოისახება მზომი სიდიდის ერთეულებში, უწოდებენ სხვაობას ხელსაწყოს ჩვენებასა – X^* და მზომი სიდიდის ნამდვილ მნიშვნელობას – X შორის.

$$\Delta X = X^* - X \quad (2.1)$$

ΔX - სტატისტიკური ცდომილება ბევრ შემთხვევაში შეიძლება შემდეგნაირად წარმოვადგინოთ:

$$\Delta X = \Delta_{\Sigma} - \Delta_{\Phi} \quad (2.2)$$

Δ_{Σ} - სისტემატური მდგენელი, Δ_{Φ} - შემთხვევითი მდგენელი

ΔX , როგორც ჯამი მუდმივი და შემთხვევითი სიდიდეებისა, არის შემთხვევითი სიდიდე, ამიტომ მეტროლოგიური მახასიათებლების შეფასებისას, აუცილებელია ვი-სარგებლოთ შემთხვევითი სიდიდეების აპარატით.

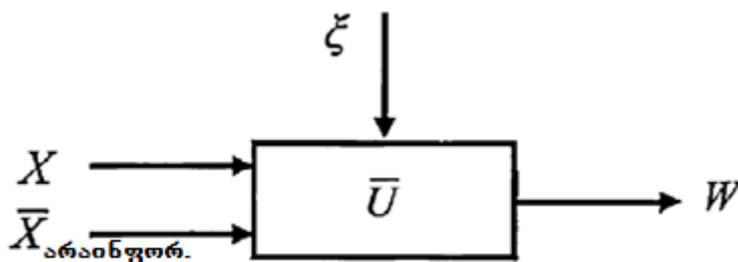
შემოვიყვანოთ ცდომილებების განაწილების კანონის ზოგიერთი აუცილებელი რიცხობრივი მახასიათებლები.

პირველი მომენტი - მათემატიკური ლოდინი $M\{\Delta X\} = \Delta_{\Sigma}$, განსაზღვრავს ΔX -ს მნიშვნელობას ან (2.2) განტოლების თანახმად ცდომილების სისტემატურ მდგენელს - Δ_{Σ} .

მეორე მომენტი - დისპერსია - $\sigma^2 = M\{[\Delta X - M\{\Delta X\}]^2\}$, ახასიათებს შემთხვევითი ცდომილების გაფანტვის სიმძლავრეს Δ_{Σ} მახლობლად.

გარდა ამისა, გაფანტვის სიდიდის ნათლად დასახასიათებლად, იყენებენ ცდომილების საშუალო კვადრატულ გადახრას, რომელიც ტოლია დისპერსიიდან კვადრატული ფესვისა.

კონდუქტომეტრული გაზომვის პროცესში, მზომი გარდამსახი, გარდაქმნის მზომი სიდიდის - X მნიშვნელობას კონდუქტომეტრის რეგისტრირებულ W - გამოსავალ სიგნალში. ნახ.2.2- ზე წარმოდგენილია კვაზისტატისტიკური კონდუქტომეტრული გაზომვის პრინციპიალური სქემა.



ნახ. 2.2 კვაზისტატისტიკური კონდუქტომეტრული გაზომვის პრინციპიალური სქემა.

ცდომილებების შემცირებისათვის სასურველია გამოვიცხოთ ან მაქსიმალურად შევამციროთ გარე ფაქტორების გავლენა- \bar{u} (წნევა, გარემო ტემპერატურა, ტენიანობა, კვების ძაბვის სიხშირე და ა.შ.), მზომი გარდამსახის ხმაური $\bar{\xi}$ და საკვლევი ხელსაწყოთა არაინფორმაციული პარამეტრები $-\bar{X}_{\text{აინ}}$. ზემოთქმულიდან გამომდინარე მზომი გარდამსახის მათემატიკურ მოდელს კვაზისტატიკურ რეჟიმში გააჩნია შემდეგი სახე:

$$W = f(X, \bar{X}_{\text{აინ}}, \bar{U}, \bar{\xi}) \quad (2.3)$$

f ფუნქციის სახე განისაზღვრება ამორჩეული მეთოდით და გაზომვის სქემით. საერთო ჯამში $\bar{X}_{\text{აინ}}$, \bar{U} , $\bar{\xi}$ წარმოადგენენ შემთხვევით სიდიდეებს, რაც მეტყველებს W დამაჯერებელ ხასიათზე, X-ის ფიქსირებულ მაგრამ არა ცნობილ მნიშვნელობებზეც კი. პარამეტრების $-\bar{X}_{\text{აინ}}$, \bar{U} , $\bar{\xi}$ ნომინალურ მნიშვნელობებზე, როცა

$$\bar{X}^{\wedge}_{\text{აინ}} = \langle \bar{X}_{\text{აინ}} \rangle$$

(აინ - საკვლევი ნიმუშის არაინფორმაციული პარამეტრები, \wedge - სიმბოლო არის სიდიდის ნომინალური მნიშვნელობა, $\langle \rangle$ - შესაბამისი პარამეტრის მათემატიკური გასაშუალების სიმბოლო)

$$\bar{U}^{\wedge} = \langle \bar{U} \rangle ; \bar{\xi}^{\wedge} = \langle \bar{\xi} \rangle = 0 ;$$

(2.3) დამოკიდებულება განსაზღვრავს კონდუქტომეტრის ნომინალურ სტატიკურ მახასიათებელს.

$$\bar{W} = f(X, \bar{X}_{\text{აინ}}, \bar{U}) \quad (2.4)$$

თუ (2.4) განტოლებას გავშლით მწკრივად გადახრის ხარისხის მიხედვით

$\Delta \bar{X}_{\text{აინ}} = \bar{X}_{\text{აინ}} - \bar{X}^{\wedge}_{\text{აინ}}$, $\Delta \bar{U} = \bar{U} - \bar{U}^{\wedge}$ და $\bar{\xi}$, X-ის ფიქსირებული მნიშვნელობისას და თუ შემოვისაზღვრებით ამ უტოლობათა სიმცირის გამო,

$$\delta \bar{X}_{\text{აინ}} = \frac{\bar{X}_{\text{აინ}} - \langle \bar{X}_{\text{აინ}} \rangle}{\bar{X}_{\text{აინ}}^{\wedge}} \ll 1, \quad \delta \bar{U} = \frac{\bar{U} - \langle \bar{U} \rangle}{\bar{U}^{\wedge}} \ll 1 \quad \text{და} \quad \frac{\bar{\xi}}{\bar{U}^{\wedge}} \ll 1, \quad \text{წრფივი}$$

მიახლოებით, მივიღებთ:

$$\Delta W = W - \bar{W}^{\wedge} = \left. \frac{\partial W}{\partial \bar{X}_{\text{აინ}}} \right|_w^{\wedge} \Delta \bar{X}_{\text{აინ}} + \left. \frac{\partial W}{\partial \bar{U}} \right|_w^{\wedge} \Delta \bar{U} + \left. \frac{\partial W}{\partial \bar{\xi}} \right|_w^{\wedge} \bar{\xi}, \quad (2.5)$$

სადაც, $\Delta W - W$ სიგნალის შემთხვევითი გადახრაა მისი $\frac{\Delta W}{W}$ ნომინალური მნიშვნელობიდან, რაც გამოწვეულია შემთხვევითი გადახრებით - $\Delta \bar{X}_{nom}$, $\Delta \bar{U}$, $\bar{\xi}$. ΔW არის კონდუქტომეტრის აბსოლუტური ცდომილება მიყვანილი მის გამოსავალთან;

$$S(\bar{X}_{nom}) = \left. \frac{\partial W}{\partial \bar{X}_{nom}} \right|_w^{\wedge}, \quad S(\bar{U}) = \left. \frac{\partial W}{\partial \bar{U}} \right|_w^{\wedge}, \quad S(\bar{\xi}) = \left. \frac{\partial W}{\partial \bar{\xi}} \right|_w^{\wedge}$$

კონდუქტომეტრის მგრძობიარობა არაინფორმაციული პარამეტრების მიმართ - \bar{X}_{nom} , \bar{U} , $\bar{\xi}$.

X-ის ფიქსირებული მნიშვნელობისათვის ΔW -ცდომილება წარმოშობს შეცდომას მზომი სიდიდის შეფასებაში, რომელიც ტოლია -

$$\Delta W = \left. \frac{\partial W}{\partial X} \right|_w^{\wedge} \Delta X, \quad \text{საიდანაც: } \Delta X = X^* - X = \frac{\Delta W}{S(X)}, \quad (2.6)$$

სადაც, $S(X) = \left. \frac{\partial W}{\partial X} \right|_w^{\wedge}$ კონდუქტომეტრის ნომინალური მგრძობიარობაა X ინფორმაციული პარამეტრის მიმართ. მაშინ (2.5) და (2.6) გამოსახულებებიდან მივიღებთ:

$$\Delta X = \frac{\Delta W}{S(X)} = \frac{1}{S(X)} [S(\bar{X}_n) \Delta \bar{X}_n + S(\bar{U}) \Delta \bar{U} + S(\bar{\xi}) \bar{\xi}]. \quad (2.7)$$

გარდა გაზომვათა ცდომილებებისა, არსებობს დამატებითი კრიტერიუმები, რომლებიც მიისწრაფვიან, ანალიზისა და კონდუქტომეტრული საშუალებების პროექტირებისას, აამაღლონ გაზომვის ზღვრები.

მზომი გარდამსახის მაქსიმალური მგრძობიარობისა და სტატისტიკური მახასიათებლის წრფივობის კრიტერიუმები ხშირად გამოიყენება გაზომვის საშუალებათა პროექტირებისა და ანალიზის ამოცანებში; თუმცადა თითქმის ყოველთვის, სწრაფვა მგრძობიარობის ამაღლებისათვის, იწვევს მეტროლოგიური მაჩვენებლების გაუარესებას, რაც აღნიშნული მაჩვენებლის ყველაზე დიდი ნაკლია.

სიზუსტის კლასი - გაზომვის საშუალებების გაფართოებული მახასიათებელი, განისაზღვრება დაშვებადი ძირითადი და დამატებითი ცდომილებების საზღვრებით, ასევე გაზომვის საშუალებების სხვა თვისებებით, რომლებიც გავლენას ახდენენ სიზუსტეზე. ამ საზღვრების

მნიშვნელობები დგინდება გაზომვის საშუალებების ცალ-ცალკე სახეების სტანდარტებზე.

ოპტიმალურობის არცთუ ნაკლებ კრიტერიუმად წარმოვიდგება $\Delta\exists$ – ეკონომიური ეფექტურობა, რაც მრეწველობაში ხელსაწყოთა გამოყენების კრიტერიუმია. ეკონომიური ეფექტი მიიღწევა მეტროლოგიური, ხარისხობრივი მაჩვენებლების გაუმჯობესების ხარჯზე, გაზომვის ხერხების ოპტიმალური პროექტირებისას და განისაზღვრებიან შემდეგნაირად:

$$\Delta\exists = \sum_i^n \Delta\exists_i = \sum_i^n k_i(I_i^* - I_i) + \sum_i^n k_i(I_i - I_i^*) \quad (2.8)$$

სადაც – $k_i - I_i - I_i^*$ მაჩვენებლის ფულადი ღირებულებაა,

I_i^*, I_i – ანალოგისა და საკვლევი ხელსაწყოთა მაჩვენებლები შესაბამისად.

k_i კოეფიციენტი განისაზღვრება პროდუქციის ღირებულებით, რომლის წარმოება კონტროლირდება ხელსაწყოთი. $\Delta\exists$ კრიტერიუმის ოპტიმიზაციისას უკეთესად მიიჩნევა ის ხელსაწყო, რომელიც იძლევა მაქსიმალურად დამატებით ეფექტს მისი მრეწველობაში რეალიზაციისას, ხარისხის მაჩვენებლების გაუმჯობესების ხარჯზე, ტექნიკურ მოთხოვნებებთან შედარებით.

კონდუქტომეტრების პროექტირებისას ყოველი აღწერილი კრიტერიუმიდან საყურადღებოა ის, რომელთა დანიშნულება მდგომარეობს კონკრეტული ტექნიკური ამოცანების ამოხსნაში, ამიტომ მათემატიკური მოდელების შემდგომი ანალიზისას, გამოვიყენებთ შემთხვევითი ცდომილების მაჩვენებლებს, ასევე მაჩვენებლებს საშუალო კვადრატული ცდომილებისას, რომელთაც თავიანთ თავს კარგი რეკომენდაცია გაუწიეს ანალიტიკური ხელსაწყოების ანალიზისას, იყენებდნენ რა სხვადასხვა ფიზიკურ მეთოდებს: აღსორბციას, ფლიუორიმეტრიულს, კონდუქტომეტრულს.

2.2. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ბაზისური სქემების სტატიკური მახასიათებლების აგება

მოცემულ პარაგრაფში განვსაზღვროთ ტრანსფორმატორულ კონდუქტომეტრიაში შედარებით ხშირად გამოყენებადი სქემები, შევადგინოთ მათთვის მათემატიკური მოდელები და სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკური მოდელები შემდგომი ანალიზისა და პარამეტრული ოპტიმიზაციის ჩატარებისათვის. ნაშრომში [8] ორმაგტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრისათვის მათემატიკური მოდელი წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$I_p = \frac{\chi W_1 U}{W_2 K_p} \quad (2.9)$$

სადაც, I_p -არის დენი თხევადურ ხვიაში, U - გენერატორის კვების ძაბვა, W_1 - $T1$ ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ხვიათარიცხვი, W_2 - $T1$ ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილის ხვიათარიცხვი, K_p - უჯრედის მუდმივა, χ -სითხის კუთრი ელექტროგამტარებლობა.

ამგვარ მათემატიკურ მოდელებში არ არის გათვალისწინებული ინდუქციურობის, ურთიერთინდუქციურობის, თხევადი ხვიის ტევადობის და სხვა პარამეტრები, რომელთა გარეშეც შეუძლებელია შესრულდეს სრული პარამეტრული ოპტიმიზაცია. გარდა ამისა, მრავალგრაგნილიანი ტრანსფორმატორული სქემებისათვის (ნახ. 2.3), არ შეიძლება გამოვიყენოთ მათემატიკური სქემები, რომლებიც ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორებისათვის არის დაწერილი, რადგანაც ამ მოდელზე გათვლილ ხელსაწყოებს გააჩნიათ მნიშვნელოვანი ცდომილებანი. ამიტომაც, შემუშავებული კონდუქტომეტრების ხარისხობრივი მახასიათებლების ამადლებისათვის, აუცილებელია გავითვალისწინოთ ცდომილებების ყველა შესაძლო წყარო, რისთვისაც შემუშავებულ იქნა მათემატიკური მოდელები ყველა, შედარებით გავრცელებული ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების სქემებისათვის [28,29].

ძირითად სტრუქტურულ სქემებზე, რომლებიც წარმოდგენილია ნახ.2.3-ზე არის შემდეგი აღნიშვნები: $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$ – ტრანსფორმატორის გრაგნილების ინდუქციურობები; $M_{1,2}; M_{1,5}; M_{2,5}; M_{3,4}; M_{3,6}; M_{4,6}$ – ტრანსფორმატორის გრაგნილებს შორის ურთიერთინდუქციურობები; Z – საკვლევი ხსნარის იმპედანსი, რომელსაც გააჩნია აქტიური – R_x და რეაქტიული – X მდგენელები; C_p – თხევადი ხვიის ტევადობა; $R_{\text{დ}}$ – მეორე ტრანსფორმატორის გამოსავალი გრაგნილის დატვირთვის წინაღობა; $R_{\text{შ}}$ – მზომი რეზისტორი ცნობილი წინაღობით.

ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრების (ნახ.2.3.ა,ბ) განსხვავებულ თავისებურებად გვევლინება ის, რომ გაზომვებს აწარმოებენ ტრანსფორმატორის მკვებავ გრაგნილზე. გაზომვები შეიძლება ჩავატაროთ ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე დენის გაზომვით (ნახ.2.3.ა) ან ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე ძაბვის ვარდნის გაზომვით (ნახ. 2.3.ბ). როგორც წესი, ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებში იყენებენ უშუალო შეფასების მეთოდს, რომლის დროსაც მზომი სიდიდე, მოცემულ შემთხვევაში ელექტროგამტარებლობა, გარდაიქმნება მოწყობილობის გამოსავალ სიგნალად, ძაბვა – U , ან დენი – I , გამოიყენება შემდეგ სქემებში (ნახ. 2.3.ა,ბ,გ,დ). უშუალო შეფასების მეთოდის ნაკლად ჩაითვლება მზომი წრედის დამოკიდებულება კვების სტაბილურობაზე [16]. ძირითად ღირსებად კი, შეიძლება მივიჩნიოთ მოწყობილობის აპარატურული გაფორმების სიმარტივე და შესაბამისად მოწყობილობის საიმედოობა.

სტატიკური მახასიათებლის მათემატიკურ მოდელს, ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისათვის, დაფუძნებულს გაზომვის პირდაპირ მეთოდზე, მივიღებთ შემდეგი განტოლებათა სისტემის ამოხსნისას:

$$\begin{cases} I_1 R_1 + I_1 j \omega L_1 + I_2 j \omega M_{1,2} = U \\ I_2 Z_p + I_2 j \omega L_2 + I_1 j \omega M_{1,2} = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

ნახ.2.3ა-ზე გამოსახული სქემისათვის, კუთრი ელექტროგამტარებლობა L_1 ინდუქციურობაზე ძაბვის ვარდნის მიხედვით ტოლია:

$$U_{L1} = U \left[\frac{R+R'}{(R+R')^2 + \omega^2(L_1-L')^2} + j\omega \frac{L_1-L'}{(R+R')^2 + \omega^2(L_1-L')^2} \right] \quad (2.11)$$

$$\text{სადაც, } R' = \frac{\omega^2 M_{1,2}^2 R}{R^2 + (\omega L_2 - X)^2} \quad (2.12)$$

$$L' = \frac{\omega^2 M_{1,2}^2 (\omega L_2)}{R^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (2.13)$$

პირველადი გარდამქმნელის Z_p იმპედანსის მდგენელი, რომელიც გამოსახულია პირველადი საზომი გარდამსახის მუდმივათი A , საკვლევი სითხის კუთრი ელექტროგამტარებლობით $-\chi$ და მისი ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობით $-\epsilon$, ტოლია:

$$R_X = A \frac{\chi}{\chi^2 + (\omega \epsilon_0 \epsilon)^2} \quad (2.14)$$

$$X = A \frac{\omega \epsilon \epsilon_0}{\chi^2 + (\omega \epsilon_0 \epsilon)^2} \quad (2.15)$$

კუთრი ელექტროგამტარებლობის შეფასებისას დენის მიხედვით L_1 ინდუქციურობაზე და პირობითი $R_1 = 0$ დროს, დენი ტოლი იქნება:

$$I_1 = U \left[\frac{R'}{(R')^2 + \omega^2(L_1-L')^2} - j\omega \frac{L_1-L'}{(R')^2 + \omega^2(L_1-L')^2} \right] \quad (2.16)$$

ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრები ერთმანეთთან დაკავშირებულნი არიან საკვლევი ხსნარით, რაც მათ განმასხვავებელ განსაკუთრებულობად გვევლინება (ნახ. 2.3გ,დ,ე,ვ,ზ,თ). პირველი ტრანსფორმატორი წარმოადგენს მკვებავს, აინდუცირებს მაგნიტურ ველს თხევად ხვიაზე, ხოლო მეორე ტრანსფორმატორი კი მზომია, რომლის მკვებავ გრაგნილს წარმოადგენს თხევადი ხვიის მილი საკვლევი ხსნარით.

ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებში გამოიყენება უშუალო შეფასების მეთოდი, კომპენსაციური და შედარების მეთოდი.

$$\begin{cases} I_1 j\omega L_1 + I_\chi j\omega M_{1,2} = U_1 \\ I_\chi R_\chi + I_\chi j\omega L_\chi + I_1 j\omega M_{1,2} + I_2' j\omega M_{3,4} = 0 \\ I_2' R_2' + I_2' j\omega L_4 + I_\chi j\omega M_{3,4} = 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

სადაც, I_χ , R_χ – დენი და წინაღობაა თხევად ხვიაში

I_2' , R_2' – დენი და წინაღობა მეორე ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილზე

L_χ – სითხიანი ხვიის ინდუქტიურობა, $L_\chi = L_1 + L_2$

თუ ჩავთვლით რომ, $L_{\chi\Sigma} = L_\chi - \frac{M_{1,2}^2}{L_1}$ მაშინ,

$$\begin{aligned} I_2' = \omega^2 \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4} (L_4 R_\chi + L_{\chi\Sigma} R_2')}{L_1 [(R_2' R_\chi + \omega^2 M_{3,4}^2 - L_{\chi\Sigma} L_4^2 \omega^2)^2 + \omega^2 (L_4 R_\chi + L_{\chi\Sigma} R_2')^2]} + \\ + j\omega \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4} (R_2' R_\chi + \omega^2 M_{3,4}^2 - L_{\chi\Sigma} L_4 \omega^2)}{L_1 [(R_2' R_\chi + \omega^2 M_{3,4}^2 - L_{\chi\Sigma} L_4^2 \omega^2)^2 + \omega^2 (L_4 R_\chi + L_{\chi\Sigma} R_2')^2]} \end{aligned} \quad (2.18)$$

სადაც, U_1 –ძაბვაა პირველი ტრანსფორმატორის პირველ გრაგნილში. თუ ინფორმაციულ პარამეტრად მიღებულია დენი გამოსავალ გრაგნილში, ამასთან $R_2' = 0$, მაშინ

$$I_2' = \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4} (L_4 R_\chi)}{L_1 [(M_{3,4}^2 - L_4 L_{\chi\Sigma})^2 + (L_4 R_\chi)^2]} + j\omega \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4} (M_{3,4}^2 - L_{\chi\Sigma} L_4)}{L_1 [(M_{3,4}^2 - L_4 L_{\chi\Sigma})^2 + (L_4 R_\chi)^2]} \quad (2.19)$$

თუ ინფორმაციულ სიგნალად მივიღებთ გამოსავალ ძაბვას, მაშინ $R_2' \gg Z_P$ შემთხვევაში იგი ტოლი იქნება:

$$U_2 = \omega^2 \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4} L_{\chi\Sigma}}{L_1 [(R_\chi^2 + \omega^2 (L_{\chi\Sigma})^2]} + j\omega \frac{U_1 M_{1,2} M_{2,3} R_\chi}{L_1 [(R_\chi^2 + \omega^2 (L_{\chi\Sigma})^2]} \quad (2.20)$$

თუ დაწვრილებით განვიხილავთ მიღებულ განტოლებებს და დავეუშვებთ, რომ $R_\chi = \frac{A}{\chi} \gg X_L, X_M$, მაშინ (2.20) და (2.21) განტოლებები პირველად საზომ გარდამქმნელზე გამარტივდებიან:

$$I_2' \approx \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 L_4 A} \chi + j\omega \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4} (M_{3,4}^2 - L_{\chi\Sigma} L_4)}{L_1 (L_4 A)^2} \chi^2 \quad (2.21)$$

$$U_2 \approx \omega^2 \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4} L_{\chi\Sigma}}{L_1 (A)^2} \chi^2 + j\omega \frac{U_1 M_{1,2} M_{2,3}}{L_1 A} \chi \quad (2.22)$$

(2.22) და (2.23) გამოსახულებები შემდგომში გამოყენებულ იქნებიან სტატიკური ანალიზისათვის. გამოსახულებებიდან გამომდინარეობს, რომ თუ ინფორმაციულ პარამეტრად მივიღებთ გამოსავალი დენის აქტიურ მდგენელს, მაშინ არ გვექნება გაზომვის შედეგის დამოკიდებულება კვების ძაბვის სისწირეზე, ხოლო თუ ინფორმაციულ პარამეტრად მივიჩნევთ ძაბვას, მისი აქტიური მდგენელი დამოკიდებული იქნება კვების ძაბვის სისწირის კვადრატზე.

მრავალგრაგნილიანი ტრანსფორმატორები წარმოდგენილია ნახ.2.3.ე,ვ,ზ,თ. ისინი გამოიყენებენ გაზომვის კომპენსაციურ მეთოდს, გამოირჩევიან სიზუსტით და არიან სტაბილურები, ამიტომ მსგავს სქემებზე დაფუძნებული კონდუქტომეტრები გამოიყენებიან აგრესიული გარემოს კონტროლისათვის წარმოებასა და სხვადასხვა ტექნოლოგიურ პროცესებში.

კომპენსაციური მეთოდის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ ძაბვის ვარდნა ან დენი, ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის თხევად ხვიაში, ნულამდე კომპენსირდება შემხვედრი ძაბვით ან დენით.

არსებული მეთოდის ნაკლი ისაა, რომ აუცილებელია ორი ცვლადი ერთეულის არსებობა, რასაც მიყვავართ დროის გაზომვის ზრდასთან, იმდენად რამდენადაც სრული კომპენსაციისათვის მოითხოვება ცვლადი ერთეულის არაერთი ცვლილება [16].

ნახ.2.3.ე,ვ-ზე წარმოდგენილ სქემებში გაზომვის შედეგებზე გავლენას ახდენენ გარდამქმნელის პარამეტრები, სახელდობრ: R_1 -გარდამქმნელის შესავალი წინაღობა, k -გარდამქმნელის დენის კოეფიციენტი ამ შესავალი წინაღობის გავლით გამოსავალ ძაბვაზე, R_2 - გამოსავალი წინაღობა.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ინდუქციური კონდუქტომეტრები გამოიყენებიან მაღალი კუთრი ელექტროგამტარებლობის ხსნარების გასაზომად, მაშინ საკვლევი ხსნარის გამტარებლობის ტევადობითი მდგენელი შეიძლება უგულებელვყოთ. სტატიკური მახასიათებელი ნახ. 2.3.ე,ვ წარმოდგენილი სქემებისთვის შეიძლება მივიღოთ შემდეგი განტოლებათა სისტემის ამოხსნით:

$$\begin{cases} I_1 j\omega L_1 + I_2 j\omega M_{1,2} + I_5 j\omega M_{1,5} = U \\ R + I_2 j\omega(L_2 + L_3) + I_1 j\omega M_{1,2} + I_5 j\omega M_{2,5} - I_6 j\omega M_{3,6} + I_4 j\omega M_{3,4} = 0 \\ I_5 R_1 + I_5 j\omega L_5 + I_1 j\omega M_{1,5} + I_2 j\omega M_{2,5} = 0 \\ I_6 R_2 + I_6 j\omega L_6 - I_4 j\omega M_{4,6} - I_2 j\omega M_{2,6} = I_5 k \\ I_4 R_3 + I_4 j\omega L_4 + I_2 j\omega M_{3,4} - I_6 j\omega M_{4,6} = 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

სადაც, $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ -დენები შესაბამის ინდუქციურობებზე $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$; k - კომპენსირებადი მოწეობილობის გადაცემის კოეფიციენტი; თუ I_1 გამოვთვლით პირველი განტოლებიდან და ჩავსვამთ დანარჩენში მივიღებთ:

$$\begin{cases} I_2(R + j\omega(L_2 + L_3) - j\omega \frac{M_{1,2}^2}{L_1}) = \\ = \frac{UM_{1,2}}{L_1} - j\omega[-I_5 \frac{M_{1,5}M_{1,2}}{L_1} + I_5 M_{2,5} - I_6 M_{3,6} + I_4 M_{3,4}] \\ I_5[R_1 + j\omega L_5 - j\omega \frac{M_{1,5}^2}{L_1}] = - \frac{UM_{1,5}}{L_1} - j\omega[-I_2 \frac{M_{1,5}M_{1,2}}{L_1} + I_2 M_{2,5}] \\ I_6(R_2 + j\omega L_6) = I_5 k - j\omega(-I_4 M_{4,6} - I_2 M_{2,6}) \\ I_4(R_3 + j\omega L_4) + I_2 j\omega M_{3,4} - I_6 j\omega M_{4,6} = 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

ამ სისტემის ამოხსნა გაადვილდება, თუ მივიღებთ რომ $R \gg \omega(L_2 + L_3)$ და $\omega \frac{M_{1,2}^2}{L_1}$, $R_1 \gg \omega L_5$, ასევე $\omega \frac{M_{1,5}^2}{L_1}$, $R_2 \gg \omega L_6$. მაშინ მივიღებთ, რომ ამ დენებით გამოწვეული ძაბვის ვარდნა განისაზღვრება ძირითადად, მხოლოდ მათი აქტიური ნაწილით, ხოლო რეაქტიული მდგენელი შეიძლება ნულის ტოლად მივიჩნიოთ. მაშინ სისტემას ექნება სახე:

$$\begin{cases} I_2 R = - \frac{UM_{1,2}}{L_1} \\ I_5 R_1 = - \frac{UM_{1,5}}{L_1} \\ I_6 R_2 = I_5 k \\ I_4(R_3 + j\omega L_4) + I_2 j\omega M_{3,4} - I_6 j\omega M_{4,6} = 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

საიდანაც,

$$I_4(R_3 + j\omega L_4) - \frac{UM_{1,2}}{L_1 R} j\omega M_{3,4} + \frac{UM_{1,5} k}{L_1 R_1 R_2} j\omega M_{4,6} = 0 \quad (2.26)$$

დენის გაზომვისას, ($R_2' = 0$) კონდუქტომეტრის მათემატიკური მოდელი იქნება:

$$I_{\text{გამ}} = \frac{UM_{1,2}M_{3,4}}{L_1L_4R} - \frac{UM_{1,5}M_{4,6}k}{R_1R_2L_1L_4} \quad (2.27)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ გაზომვის შედეგი არ არის დამოკიდებული კვების ძაბვის სიხშირეზე, ხოლო გამოსავალი დენის ფაზათა ძვრა კვების ძაბვასთან შედარებით არ არსებობს.

ამოსავალი ძაბვის გაზომვისას ($R_2' \gg \omega L_4$) კონდუქტომეტრის მათემატიკურ მოდელს ექნება სახე:

$$U_{\text{გამ}} = j\omega \left[\frac{UM_{1,2}M_{3,4}}{L_1R} - \frac{UM_{1,5}M_{4,6}k}{R_1R_2L_1} \right] \quad (2.28)$$

(2.28) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ გამოსავალი ძაბვა დამოკიდებულია კვების ძაბვის სიხშირეზე, ხოლო მისი ფაზა დაძრულია 90° კვების ძაბვასთან შედარებით.

კომპენსაციური მეთოდის დროს გაზომვის პროცესის დასრულების კრიტერიუმად გვევლინება პირობების შესრულება:

$I_{\text{გამ}}=0, U_{\text{გამ}}=0$. იმის გათვალისწინებით, რომ $R = \frac{A}{\chi}$, მივიღებთ სტატიკური მახასიათებლის შემდეგ განტოლებებს მზომი წრედის წონასწორობის რეგისტრაციის ორივე პროცესისათვის:

$$\frac{M_{1,2}M_{3,4}\chi R_1R_2L_1}{L_1M_{1,5}M_{4,6}A} = k \quad (\text{პირობა } I_{\text{გამ}}=0) \quad (2.29)$$

$$\frac{M_{1,2}M_{3,4}\chi R_1R_2L_1}{L_1M_{1,5}M_{4,6}A} = k \quad (\text{პირობა } U_{\text{გამ}}=0) \quad (2.30)$$

როგორც (2.29) და (2.30) გამოსახულებებიდან ჩანს, ორივე განტოლება ერთნაირია ორივე შემთხვევისათვის, ამასთან მზომი გარდამქმნელების რეალიზაცია მათთვის განსხვავებულია. თუ კონდუქტომეტრებისათვის გავითვალისწინებთ დამოკიდებულებას მგრძნობიარობასა და კვების ძაბვის სიხშირეს შორის წონასწორობის წერტილში, $U_{\text{გამ}}=0$ პირობის დროს, და თუ შემოვიყვანთ დამატებით მოწყობილობებს დისბალანსის მიმართულების განსაზღვრისათვის,

რეალიზაცია ასეთ კონდუქტომეტრებში, ასეთი პირველადი საზომი გარდამქმნელების პირობით $I_{გაგ}=0$ – შედარებით უფრო მისაღებია.

ნახ.2.3.ზ,თ-ზე მოცემულ სქემებზე განტოლებათა სისტემას, რომელიც აღწერს კონდუქტომეტრის მუშაობას, ექნება შემდეგი სახე:

$$\begin{cases} I_1 j\omega L_1 + I_2 j\omega M_{1,2} = U \\ I_2 R + I_2 j\omega(L_2 + L_3) + I_1 j\omega M_{1,2} + I_4 j\omega M_{3,4} - I_5 j\omega M_{3,5} = 0 \\ I_5 R_1 + I_5 j\omega L_5 - I_2 j\omega M_{3,5} - I_4 j\omega M_{4,5} = kU \\ I_4 R_2 + I_4 j\omega L_4 + I_2 j\omega M_{2,4} + I_5 j\omega M_{4,5} = 0 \end{cases}$$

სისტემის პირველი განტოლებიდან განვსაზღვროთ $I_1 = \frac{U}{j\omega L_1} - I_2 \frac{M_{1,2}}{L_1}$; ჩავსვათ (2.32) სისტემებში და მივიღებთ:

$$\begin{cases} I_2(R + j\omega(L_2 + L_3) - j\omega \frac{M_{1,2}^2}{L_1}) + I_4 j\omega M_{3,4} - I_5 j\omega M_{3,5} = -\frac{UM_{1,2}}{L_1} \\ I_5(R_1 + j\omega L_5) - I_2 j\omega M_{3,5} - I_4 j\omega M_{4,5} = kU \\ I_4 R_2 + I_4 j\omega L_4 + I_2 j\omega M_{2,4} + I_5 j\omega M_{4,5} = 0 \end{cases} \quad (2.32)$$

თუ კონდუქტომეტრის კონსტრუქციისათვის შევასრულებთ პირობას:

$R \gg \omega(L_2 + L_3) - \omega \frac{M_{1,2}^2}{L_1}$ და $R \gg \omega L_5$, მივიღებთ:

$$\begin{cases} I_2 R = -\frac{UM_{1,2}}{L_1} \\ I_5 R_1 = kU \\ (R_2 + j\omega L_4) + I_2 j\omega M_{2,4} - I_5 j\omega M_{4,5} = 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

ამ სისტემის ამოხსნისას მივიღებთ განტოლებას, რომელიც აკავშირებს კონდუქტომეტრის გამოსავალ სიგნალს პირველადი საზომი გარდამქმნელის პარამეტრებთან და ასევე საკვლევ ხსნართან:

$$I_4(R_2 + j\omega L_4) - \frac{UM_{1,2}}{L_1 R} j\omega M_{2,4} + \frac{kU}{R_1} j\omega M_{4,5} = 0 \quad (2.34)$$

(2.34) გამოსახულება შეიძლება გამოვიყენოთ შემდგომი ხარისხობრივი ანალიზისას. თუ პირველადი გარდამქმნელის გამოსავალი სიგნალის ნაცვლად გამოვიყენება დენი, ანუ $R_2=0$, მივიღებთ:

$$I_4 = \frac{UM_{1,2}M_{2,4}}{L_1RL_4} - \frac{UM_{4,5}k}{R_1L_4} \quad (2.35)$$

თუ გამოსავალ სიგნალად გვევლინება ძაბვა, ანუ სრულდება პირობა $R_2 \gg \omega L_4$, მივიღებთ:

$$U_{გამ} = j\omega \frac{UM_{1,2}M_{2,4}}{L_1R} - \frac{UM_{4,5}k}{R_1} \quad (2.36)$$

ისევე როგორც წინა შემთხვევაში, გამოსავალი დენის გაზომვისას, გაზომვის შედეგი არ არის დამოკიდებული პირველადი საზომი გარდამქმნელის კვების ძაბვის სისწორეზე. გამოსავალი ძაბვის რეგისტრაციისას ეს დამოკიდებულება არსებობს. თუ გამოვიყენებთ გაზომვის კომპენსაციურ მეთოდს, რომლის წონასწორობის კრიტერიუმად გვევლინება $I_4=0$ და $U_{გამ}=0$ პირობის შესრულება, ორივე შემთხვევაში სტატიკური მახასიათებლები ერთნაირია და აქვთ სახე:

$$\frac{M_{1,2}M_{2,4}\chi R_1}{L_1M_{4,5}A} = k \quad (2.37)$$

ანალიზის ჩატარებისას არ იყო გათვალისწინებული უქმი სვლის დენის მდგენელები (გულარში აქტიური დანაკარგები) და ხსნარის წინააღმდეგობის რეაქტიული მდგენელი. შეიძლება დავუშვათ, რომ კონდუქტომეტრებში შედარების არხებისათვის საყრდენი ძაბვა, რომელიც ნახ.2.3.ე-ის სქემების მარეალიზებელია, მიიღება კვების ტრანსფორმატორიდან, ხოლო ნახ.2.3ზ,თ-ზე წარმოდგენილ კონდუქტომეტრების მარეალიზებელ სქემებზე, ეს ძაბვა მოდის უშუალოდ გენერატორის გამოსავალიდან. სტატიკური მახასიათებლის საკვლევი გარემოს ტემპერატურის ცვლილება წარმოდგენილია ნახ.2.3.ე-ზე და (2.38) გამოსახულებით, ხოლო ნახ.2.3.ზ,თ-ზე – (2.39) გამოსახულებით:

$$k = \frac{M_{1,2}[1+\alpha_{1,2}(t-t_0)]\chi M_{3,4}[1+\alpha_{3,4}(t-t_0)]R_1R_2}{M_{1,5}A[1+\alpha_{1,5}(t-t_0)]M_{4,6}[1+\alpha_{4,6}(t-t_0)]} \quad (2.38)$$

$$k = \frac{M_{1,2}[1+\alpha_{1,2}(t-t_0)]M_{2,4}[1+\alpha_{3,4}(t-t_0)]R_1\chi}{L_1[1+\alpha_1(t-t_0)]M_{4,5}[1+\alpha_{4,5}(t-t_0)]A} \quad (2.39)$$

თუ ჩავთვლით, რომ ინდუქციურობისა და ურთიერთინდუქციურობის ცვლილება ძირითადად დამოკიდებულია გულარების მაგნიტური გამტარობის ცვლილებაზე, მაშინ ურთიერთინდუქციურობის ცვლილება ხვდება შორის, რომლებიც ერთ გულარზეა განლაგებული, ერთნაირია, ე.ი. სრულდება შემდეგი პირობები: $\alpha_{1,2} = \alpha_{1,5}$; $\alpha_{3,4} = \alpha_{4,6}$; $\alpha_{2,4} = \alpha_{4,5}$. ამასთან, სტატიკური მახასიათებელი ნახ.2.3.ე,ვ სქემისათვის (2.40) განტოლებითაა წარმოდგენილი, ხოლო ნახ.2.3.ზ,თ სქემისათვის – (2.41) განტოლებით:

$$k = \frac{M_{1,2}\chi M_{3,4}R_1R_2}{M_{1,5}AM_{4,6}} \quad (2.40)$$

$$k = \frac{M_{1,2}[1+\alpha_{1,2}(t-t_0)]\chi M_{2,4}R_1}{L_1A[1+\alpha_1(t-t_0)]M_{4,5}} \quad (2.41)$$

როგორც ჩანს, მიღებული გამოსახულებებიდან, კონდუქტომეტრების გამოსავალი სიგნალი, რომელიც არეალიზებს ნახ.2.3.ე,ვ გამოსახულ სქემას, არ არის დამოკიდებული პირველადი საზომი გარდამქმნელის ტემპერატურაზე, ხოლო ნახ.2.3.ზ,თ სქემაზე გამოსახული კონდუქტომეტრები არ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე, თუ სრულდება პირობა: $\alpha_{1,2} = \alpha_1$.

2.3. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ბაზური სქემების სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკური მოდელების გამოთვლა

სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკურ მოდელს (2.12) ძაბვის მიხედვით, ნახ.2.3 ა-ზე გამოსახულ ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის შემთხვევაში, გააჩნია აქტიური (2.42) და რეაქტიული (2.43) მდგენელები:

$$W = \frac{R+R'}{(R+R')^2 + \omega^2(L_1-L')^2} \quad (2.42)$$

$$W = \frac{L_1 - L'}{(R + R')^2 + \omega^2(L_1 - L')^2} \quad (2.43)$$

განვიხილოთ განტოლებები ცალ-ცალკე იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ რომელი მდგენელი ახდენს მეტ გავლენას გაზომვის შედეგებზე.

ჩავსვათ (2.12) (2.13) განტოლებები განტოლების აქტიურ მდგენელში:

$$W = \frac{R^5 + 2R^3\omega^2L_2^2 + R\omega^4L_2^4 + \omega^2M_{1,2}^2R^3 + \omega^4M_{1,2}^2RL_2^2}{R^6 + 2R^4\omega^2L_2^2 + R^2\omega^4L_2^4 + 2\omega^2M_{1,2}^2R^4 + 2\omega^4M_{1,2}^2RL_2^2 + R^2\omega^4M_{1,2}^4 + R^4\omega^2L_1^2 + 2R^2L_1^2\omega^4L_2^2 + \omega^6L_1^2L_2^4 - 2\omega^5M_{1,2}^2L_2L_1R^2 - 2\omega^7M_{1,2}^2L_2^3L_1 + \omega^8M_{1,2}^4L_2^2} \quad (2.44)$$

(2.44) გამოსახულება რთულია. გამარტივებისათვის დავუშვათ:

1) რადგან მსგავსი კონდუქტომეტრები გამოიყენებიან კარგად გამტარი ხსნარების კუთრი ელექტროგამტარებლობის გაზომვისათვის, მაშინ ტევადობითი მდგენელი პრაქტიკულად უგულვებელყოფილია, ამიტომ

$$R = \frac{A}{\chi} \quad (2.45)$$

2) მეორე და უფრო მაღალი ხარისხების ურთიერთინდუქციურობები ჩავთვალოთ ნულის ტოლად, მაშინ:

$$W = \frac{R^5 + 2R^3\omega^2L_2^2 + R\omega^4L_2^4}{R^6 + 2R^4\omega^2L_2^2 + R^2\omega^4L_2^4 + 2\omega^2M_{1,2}^2R^4 + R^4\omega^2L_1^2 + 2R^2L_1^2\omega^4L_2^2 + \omega^6L_1^2L_2^4} \quad (2.46)$$

საბოლოოდ, გამარტივების შემდეგ (2.44) განტოლება მიიღებს სახეს:

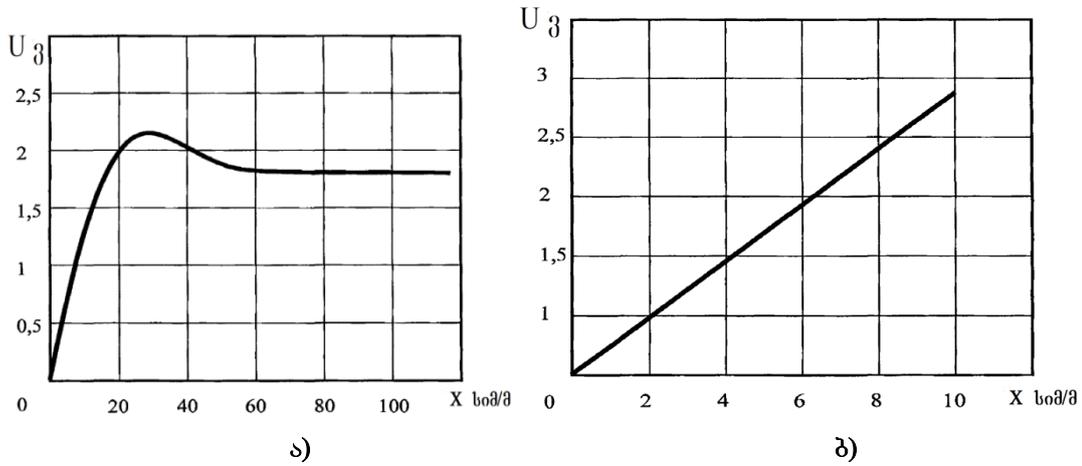
$$W = \frac{R}{R^2 + \omega^2L_1^2} \quad (2.47)$$

(2.47) ჩავსვათ (2.45) და გამარტივების შემდეგ მივიღებთ:

$$W = \frac{A\chi}{A^2 + \chi^2\omega^2L_1^2} \quad (2.48)$$

(2.48) გამოსახულება წარმოადგენს ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისათვის სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკურ

მოდელს აქტიური მდგენელისათვის ძაბვის მიხედვით. რომლის მიხედვითაც აგებულია ნახ.2.4-ზე წარმოდგენილი გრაფიკები.



ნახ.2.4. ძაბვის აქტიური მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები ერთი ტრანსფორმატორის შემთხვევაში: ა- 0,1-100 სიმ/მ დიაპაზონში; ბ- 0,1 - 10 სიმ/მ დიაპაზონში.

ამ გრაფიკებიდან ჩანს, რომ ძაბვის მიხედვით აქტიური მდგენელის ინფორმაციული პარამეტრის სახით გამოყენებისას, სასურველია კონდუქტომეტრები გამოვიყენოთ გაზომვის ამ დიაპაზონში: 1 – 10 სიმ/მ, რადგანაც სწორედ ამ დიაპაზონში ჩანს წრფივი დამოკიდებულება ძაბვასა და კუთრ ელექტროგამტარობას შორის გაზომვის მთელ დიაპაზონში.

განვიხილოთ (2.43) განტოლების რეაქტიული მდგენელი. ჩავსვათ (2.12) და (2.13) განტოლები (2.43)-ში რეაქტიულ ნაწილში. ჩასმის შემდეგ განტოლებას ექნება სახე:

$$W = \frac{L_1 R^4 + 2L_1 R^2 \omega^2 L_2^2 + L_1 \omega^4 L_2^4 - \omega^3 M_{1,2}^2 L_2 R^2 - \omega^5 M_{1,2}^2 R L_2^3}{R^6 + 2R^4 \omega^2 L_2^2 + R^2 \omega^4 L_2^4 + 2\omega^2 M_{1,2}^2 R^4 + 2\omega^4 M_{1,2}^2 R L_2^2 + R^2 \omega^4 M_{1,2}^4 + R^4 \omega^2 L_1^2 + 2R^2 L_1^2 \omega^4 L_2^2 + \omega^6 L_1^2 L_2^4 - 2\omega^5 M_{1,2}^2 L_2 L_1 R^2 - 2\omega^7 M_{1,2}^2 L_2^3 L_1 + \omega^8 M_{1,2}^4 L_2^2} \quad (2.49)$$

წინა დაშვებების ანალოგიურად მივიღებთ:

$$W = \frac{L_1 R^4 + 2L_1 R^2 \omega^2 L_2^2 + L_1 \omega^4 L_2^4}{R^6 + 2R^4 \omega^2 L_2^2 + R^2 \omega^4 L_2^4 + R^4 \omega^2 L_1^2 + 2R^2 L_1^2 \omega^4 L_2^2 + \omega^6 L_1^2 L_2^4} \quad (2.50)$$

გამარტივების შემდგომ კი მივიღებთ:

$$W = \frac{L_1}{\omega^2 L_1^2 + R^2} \quad (2.51)$$

(2.51) გამოსახულება ჩავსვათ (2.45), მივიღებთ:

$$W = \frac{\chi^2 L_1}{A^2 + \chi^2 \omega^2 L_1^2} \quad (2.52)$$

(2.52) წარმოადგენს ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის სტატიკური მახასიათებლის მათემატიკურ მოდელს რეაქტიული მდგენელისათვის ძაბვის მიხედვით.

რეაქტიული მდგენელის ძაბვის მიხედვით მათემატიკური მოდელის დამოკიდებულების გრაფიკი კუთრ ელექტროგამტარობაზე გამოსახულია ნახ.2.5-ზე. ნახ.2.4.ა და ნახ.2.5.ა გრაფიკებიდან ჩანს, რომ საკვლევი ხსნარის კუთრი ელექტროგამტარობის შეფასებისას, პირველადი საზომი გარდამქმნელის ინდუქციურობაზე ძაბვის ვარდნის მიხედვით, ინფორმაციული პარამეტრის სახით სასურველია გამოვიყენოთ რეაქტიული მდგენელი.

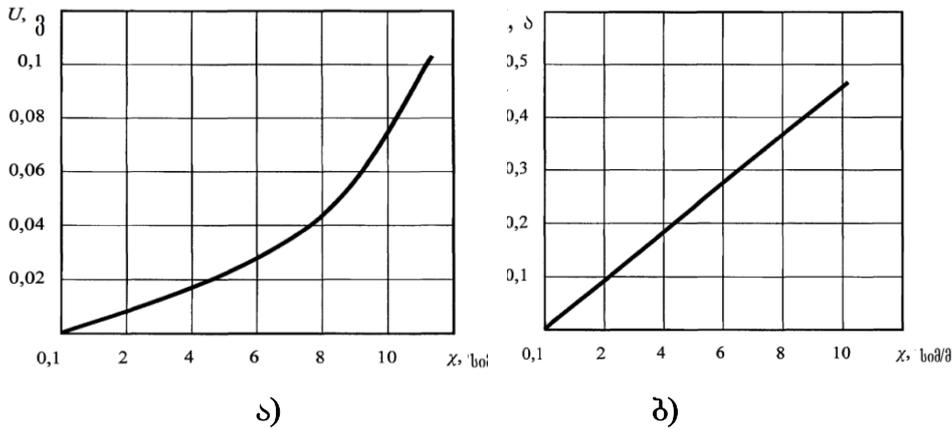
ნახ.2.3.ა სქემისათვის ჩატარებული გამოთვლების ანალოგიურად, გამოვთვალოთ მათემატიკური მოდელები დანარჩენი სქემებისთვისაც. (2.16) განტოლებიდან, ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის სქემისათვის, რომელიც დაფუძნებულია გაზომვის პირდაპირ მეთოდზე (ნახ.2.3.ბ), კუთრი ელექტროგამტარებლობის შეფასებისას L_1 ინდუქციურობის მიხედვით და $R_1=0$ პირობით, დენი ტოლია:

$$I_1 = U \left[\frac{R'}{(R')^2 + \omega^2 (L_1 - L')^2} - j\omega \frac{L_1 - L'}{(R')^2 + \omega^2 (L_1 - L')^2} \right] \quad (2.53)$$

დენის აქტიური მდგენელის მიხედვით მათემატიკური მოდელი ტოლია:

$$W = -\chi M_{1,2}^2 \frac{A}{L_1 (2\omega^3 M_{1,2}^2 L_2 \chi^2 - L_1 \omega^2 L_2^2 \chi^2 - L_1 A^2)} \quad (2.54)$$

კუთრ ელექტროგამტარებლობაზე დენის დამოკიდებულების გრაფიკი აქტიური მდგენელის მიხედვით, გამოსახულია ნახ.2.5.ბ-ზე.



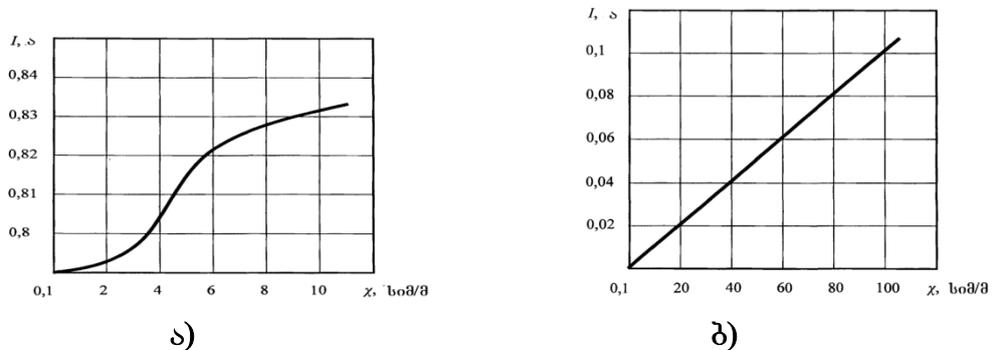
ნახ.2.5. კუთრ ელექტროგამტარობასთან დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-10 სიმ/მ დიაპაზონში: ა- ძაბვის რეაქტიული მდგენელის; ბ- დენის აქტიური მდგენელის.

დენის რეაქტიული მდგენელის მიხედვით მათემატიკური მოდელი ტოლია:

$$W = \frac{\omega^3 M_{1,2}^2 L_2 \chi^2 - L_1 \omega^2 L_2^2 \chi^2 - L_1 A^2}{L_1 \omega^2 (2\omega^3 M_{1,2}^2 L_2 \chi^2 - L_1 \omega^2 L_2^2 \chi^2 - L_1 A^2)} \quad (2.55)$$

ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისათვის მიღებული მათემატიკური მოდელის საფუძველზე აგებული დენის რეაქტიული მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარებლობასთან დამოკიდებულების გრაფიკი, წარმოდგენილია ნახ.2.6.ა-ზე.

მაშასადამე, პირველადი საზომი გარდამქმნელის გავლით საკვლევი ხსნარის კუთრი ელექტროგამტარებლობის დენით შეფასებისას სასურველია ინფორმაციული პარამეტრის სახით გამოვიყენოთ ამ დენის აქტიური მდგენელი.



ნახ.2.6.ა - დენის რეაქტიული მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარობასთან დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-10 სიმ/მ დიაპაზონში

ერთრანსფორმატორიან კონდუქტომეტრებში; ბ- დენის რეაქტიული მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარობასთან დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-100 სიმ/მ დიაპაზონში ორტრანსფორმატორიან კონდუქტომეტრებში

როგორც წესი, მსგავს მოწყობილობებს აქვთ დაბალი მგრძობიარობა და გაზომვის ვიწრო დიაპაზონი 0,1 – 10 სიმ/მ, ამიტომ მათ ძირითადად გამოიყენებენ სიგნალიზატორების სახით ხსნარებში, მარილებში და მაღალი კუთრი ელექტროგამტარებლობის ელექტროლიტებში.

მიკროპროცესორული ტექნიკის მსგავს მოწყობილობებში გამოყენება საშუალებას გვაძლევს გავაფართოვოთ გაზომვის დიაპაზონი 100 სიმ/მ – მდე, თუმცადა უფრო მიზანმიმართულია გამოვიყენოთ ორტრანსფორმატორიანი სქემები, სადაც გასაზომი და მკვებავი ხვეები დაყოფილია, რის გამოც მისი სტატიკური მახასიათებელი წრფეია დიაპაზონში 0,1–100სიმ/მ. (2.30) გამოსახულებიდან მივიღებთ სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკურ მოდელს დენის მიხედვით, აქტიური მდგენელისათვის:

$$W = \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 L_4 A} \quad (2.56)$$

ნახ.2.6.ბ-ზე წარმოდგენილია დენსა და კუთრ ელექტროგამტარებლობას შორის, დამოკიდებულების გრაფიკი ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისათვის მათემატიკური მოდელის აქტიური მდგენელისათვის.

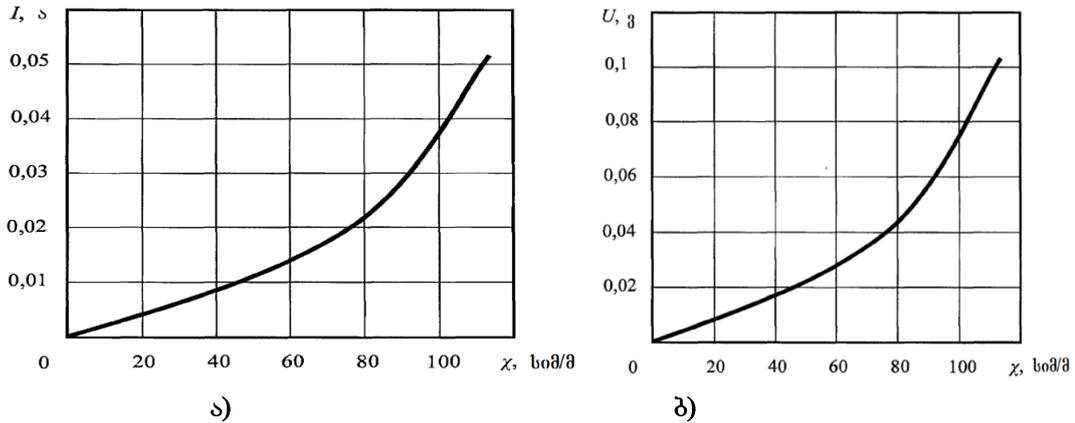
რეაქტიული მდგენელია:

$$W = \frac{\chi^2 U_1 M_{1,2} M_{3,4} L_{\chi, \Sigma}}{L_1 L_4 A^2} \quad (2.57)$$

ამ მათემატიკური მოდელის მიხედვით, ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისათვის დენის რეაქტიული მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარებლობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი წარმოდგენილია ნახ.2.7.ა-ზე.

თუ ინფორმაციული პარამეტრის სახით გამოვიყენებთ ძაბვის აქტიურ მდგენელს, მაშინ (2.23) მათემატიკურ მოდელიდან მივიღებთ:

$$W = \frac{\omega^2 \chi^2 U_1 M_{1,2} M_{3,4} L_{\chi, \Sigma}}{L_1 A^2} \quad (2.58)$$



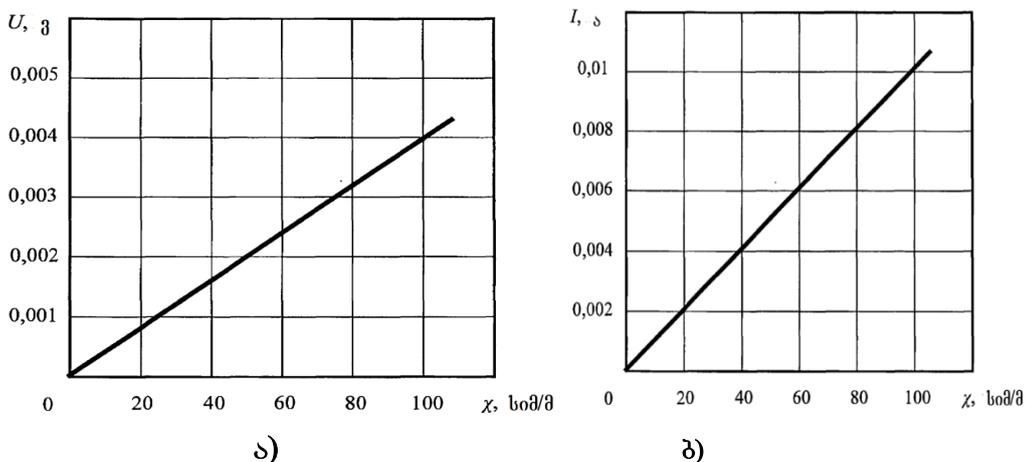
ნახ.2.7. ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისათვის: ა- დენის რეაქტიული მდგენელისა და ბ- ძაბვის აქტიური მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარობასთან დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-100 სიმ/მ დიაპაზონში.

ამ მათემატიკური მოდელის მიხედვით, ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისათვის ძაბვის აქტიური მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარებლობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი წარმოდგენილია ნახ.2.7.ბ-ზე.

ძაბვის რეაქტიული მდგენელისათვის გვექნება:

$$W = \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{2,3}}{L_1 A} \quad (2.59)$$

ამ მათემატიკური მოდელის მიხედვით, ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისათვის ძაბვის რეაქტიული მდგენელის კუთრ ელექტროგამტარებლობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი წარმოდგენილია ნახ.2.8.ა-ზე.



ნახ.2.8. ა- ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისათვის ძაბვის რეაქტიული მდგენელისა და ბ-მრავალგრაგნილიანი

კონდუქტომეტრებისათვის დენის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების კუთრ ელექტროგამტარობასთან დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-100 სიმ/მ დიაპაზონში.

(2.56) და (2.57) ფორმულებიდან ჩანს, რომ ინფორმაციული პარამეტრის სახით გამოსავალი დენის გამოყენებისას, მისი აქტიური მდგენელი პროპორციული იქნება საკვლევი ხსნარის კუთრი ელექტროგამტარებლობისა, ხოლო რეაქტიული მდგენელი მისი კუთრი ელექტროგამტარებლობის კვადრატისა.

თუკი ინფორმაციული პარამეტრის სახით გამოიყენება პირველადი საზომი გარდამქმნელის გამოსავალი ძაბვა, მაშინ ამ ძაბვის აქტიური მდგენელი პროპორციულია საკვლევი ხსნარის კუთრი ელექტროგამტარებლობის კვადრატისა (2.58), ხოლო მისი რეაქტიული მდგენელი ამ სითხის კუთრი ელექტროგამტარებლობისა (2.59).

გრაფიკებიდან ჩანს, რომ უშუალო შეფასების გამოყენებისას, ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრები ფლობენ გაზომვების გაცილებით ფართო დიაპაზონს ერთტრანსფორმატორებიანებთან შედარებით და საშუალებას იძლევიან გავზომოთ კუთრი ელექტროგამტარებლობა დიაპაზონში – 1-100 სიმ/მ. შესანიშნავი შედეგები იქნა მიღებული სქემებისთვის – ნახ.2.3 ე.გ.ზ.თ. კომპენსაციური მეთოდის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ წრფივი სტატიკური მახასიათებლები გაზომვის ყველა დიაპაზონზე, მათემატიკური მოდელების როგორც აქტიური ისე რეაქტიული მდგენელებისათვის.

ნახ.2.3.ე-ზე გამოსახული მრავალგრაგნილიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის დენის აქტიური მდგენელისათვის მათემატიკური მოდელი მიიღება (2.27) – გამოსახულებიდან:

$$W = \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 L_4 A} \quad (2.60)$$

დენის რეაქტიული მდგენელისათვის კი (2.27) გამოსახულებაში k-ს ნაცვლად ჩავსვათ (2.30) გამოსახულება და მივიღებთ:

$$W = \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 L_4 A} \quad (2.61)$$

მრავალგრაგნილიანი კონდუქტომეტრებისათვის დენის ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები აქტიური და

რეაქტიული მდგენელების მიმართ ერთნაირია და წარმოდგენილია ნახ.2.8.ბ-ზე.

ძაბვის აქტიური მდგენელის ინფორმაციული პარამეტრის სახით გამოყენების შემთხვევაში მათემატიკურ მოდელს მივიღებთ (2.28) გამოსახულებიდან:

$$W = \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 A} \quad (2.62)$$

ხოლო რეაქტიული მდგენელის მისაღებად კი (2.28) გამოსახულებაში k -ს ნაცვლად ჩავსვათ (2.30) გამოსახულება; მივიღებთ:

$$W = \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 A} \quad (2.63)$$

მრავალგრაგნილიანი კონდუქტომეტრებისათვის ძაბვის ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები აქტიური და რეაქტიული მდგენელების მიმართ ერთნაირია და წარმოდგენილია ნახ.2.9.ა-ზე.

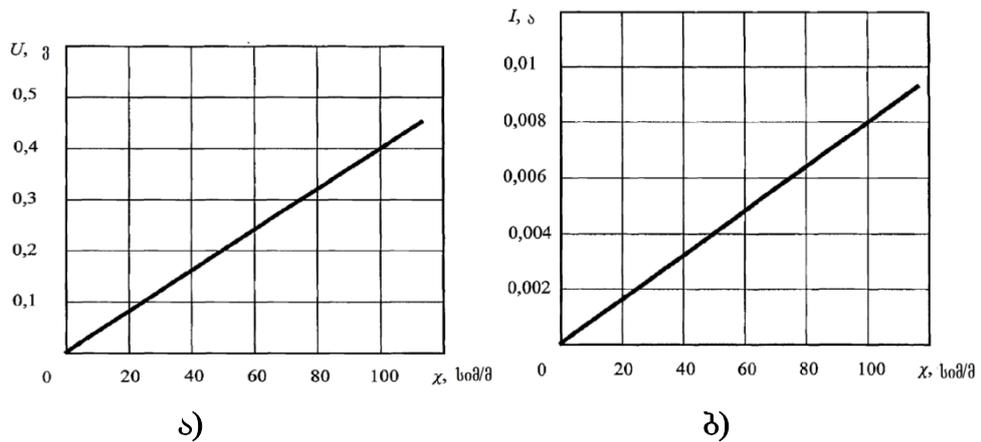
(2.35) გამოსახულებიდან მივიღებთ სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკურ მოდელს დენის მიხედვით აქტიური მდგენელებისათვის:

$$W = \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{2,4}}{L_1 L_4 A} \quad (2.64)$$

რეაქტიულისათვის კი, k -ს ნაცვლად (2.35) გამოსახულებაში ჩავსვათ (2.37) გამოსახულება და მივიღებთ:

$$W = \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{2,4}}{L_1 L_4 A} \quad (2.65)$$

მრავალგრაგნილიანი კონდუქტომეტრებისათვის დენის ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები აქტიური და რეაქტიული მდგენელების მიმართ ერთნაირია და წარმოდგენილია ნახ.2.9.ბ-ზე



ნახ.2.9. მრავალგრაგნილიანი კონდუქტომეტრებისათვის: ა- ძაბვისა და ბ- დენის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების კუთრ ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები 0,1-100 სიმ/მ დიაპაზონში.

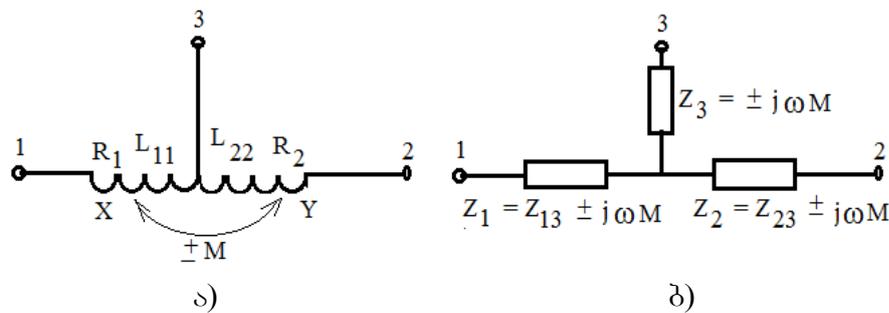
2.4. ტრანსფორმატორული საზომი ბოგას ეკვივალენტური სქემა მჭიდრო ინდუქციური კავშირით.

ორ ინდუქციურ L_{11} და L_{22} კოჭას შორის კავშირი, როგორც ცნობილია, ხასიათდება კოჭების ურთიერთინდუქციურობით M -ითა და კავშირის კოეფიციენტით $K_c = M / \sqrt{L_{11}L_{22}}$, რომლის მნიშვნელობა შეიძლება იყოს საზღვრებში $0 \leq K_c \leq 1$. კავშირს ეწოდება მჭიდრო იმ შემთხვევაში, თუ K_c კოეფიციენტის მნიშვნელობა ძალიან მცირედ განსხვავდება ერთისაგან, ანუ როცა შეიძლება მივიღო, რომ $M = \sqrt{L_{11}L_{22}}$. კოჭებს შორის მჭიდრო ინდუქციური კავშირი მიიღწევა როგორც საერთო მაგნიტურ გამტარზე მათი დახვევით, ისე დახვევის სპეციალური სახეების გამოყენებითა და კოჭების დახვეული გრაგნილების სპეციალური კომპენსაციური ჩართვით.

მჭიდრო ინდუქციური კავშირის მქონე ელემენტებიანი სქემები ყველაზე ხშირად გამოიყენება ისეთი ბოგური სქემების ანალიზის დროს, რომლებიც შეიცავენ ორ ინდუქციურად დაკავშირებულ ელემენტს და გააჩნიათ საერთო კვანძი (მხრების ელემენტების ავტოტრანსფორმატორული ჩართვა) და იშვიათად სამი მჭიდრო

ინდუქციური კავშირის მქონე ელემენტის დროს (მხრების ელემენტების ტრანსფორმატორული ჩართვა).

ლიტერატურაში [30] მოყვანილია, რომ ორი ინდუქციურად დაკავშირებული ელემენტისათვის, რომელთაც გააჩნიათ საერთო კვანძი (ნახ.2.10.ა), ეკვივალენტური სქემა წარმოდგენილია წინააღობათა სამსხვიანი ვარსკვლავით (ნახ.2.10.ბ), სადაც, $\underline{Z}_{13} = R_1 + j\omega L_{11}$ - 1-3 გრაგნილის კომპლექსური წინააღობაა, რომლის საკუთარი ინდუქციურობაა L_{11} , ხვიათა რიცხვი N_1 და აქტიური წინააღობა R_1 ; $\underline{Z}_{23} = R_2 + j\omega L_{22}$ - 2-3 გრაგნილის კომპლექსური წინააღობაა, რომლის საკუთარი ინდუქციურობაა L_{22} , ხვიათა რიცხვი N_2 და აქტიური წინააღობა R_2 ; $M = K_C \sqrt{L_{11}L_{22}}$ - კოჭებს შორის ურთიერთინდუქციურობის კოეფიციენტი, რომელთა შორის კავშირის კოეფიციენტი K_C .



ნახ.2.10. ა- საერთო კვანძის მქონე ინდუქციურად დაკავშირებული ელემენტები; ბ- მათი ეკვივალენტური სქემა.

როცა $R_1=R_2=0$ და $K_C=1$, მაშინ სამსხვიანი ვარსკვლავის წინააღობები იღებენ შემდეგ მნიშვნელობებს:

$$\underline{Z}_1 = j\omega(L_{11} \pm M); \quad \underline{Z}_2 = j\omega(L_{22} \pm M); \quad \underline{Z}_3 = \pm j\omega M; \quad (2.66)$$

სადაც, $M = \sqrt{L_{11}L_{22}}$; $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ წინააღობებს შორის (2.66)-ის შემთხვევაში სრულდება პირობა:

$$\underline{Z}_3 = -\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 / (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) \quad (2.67)$$

ანუ მოცემულია ორგრაგნილა ტრანსფორმატორული ბოგირის წონასწორობის პირობა:

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_1 = 0 \quad (2.68)$$

რეალურ პირობებში კოჭებს გააჩნიათ აქტიური წინააღობები, რომლებიც განსხვავებულია ნულისაგან $R_1 \neq 0$ და $R_2 \neq 0$. ამ შემთხვევაში

სამსხვიანი ვარსკვლავის წინაღობები [41]-ის შესაბამისად მიიღებენ შემდეგ მნიშვნელობებს:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega(L_{11} \pm M); \underline{Z}_2 = R_2 + j\omega(L_{22} \pm M); \underline{Z}_3 = \pm j\omega M; \quad (2.69)$$

ამ დროს (2.68) პირობა ფიზიკურ აზრს მოკლებულია, რადგან $\text{Re}[\underline{Z}_1 \underline{Z}_2] > 0$, $\text{Re}[\underline{Z}_2 \underline{Z}_3] > 0$; $\text{Re}[\underline{Z}_3 \underline{Z}_1] > 0$. ამ დადებითი რიცხვების ჯამი არ შეიძლება იყოს ნულის ტოლი. (2.68) გამოსახულებაში გათვალისწინებული არ არის მესამე მკვებავი გრაგნილის გავლენა (რომლის გარეშეც ბოგა არ მუშაობს) ბოგას მხრების წინაღობაზე.

რეალური ფიზიკური პროცესების შესაბამისი უმარტივესი ტრანსფორმატორული საზომი ბოგირის სქემა მოცემულია ნახ.2.11.ა.

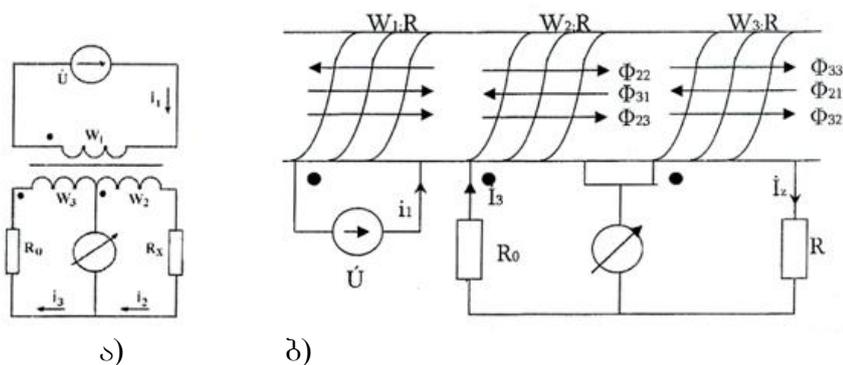
სქემა აგებულია დენების გამოკლების პრინციპზე. მეორე კონტურში გამავალი დენის სიდიდე განისაზღვრება R_x გასაზომი წინაღობით, ხოლო მესამე კონტურში გამავალი დენი კი $-R_0$ ეტალონური წინაღობით.

პირველადი გრაგნილი ხვიათა რიცხვით W_1 არის ბოგას მხრების მკვებავი გრაგნილი, ხოლო გრაგნილები ხვიათა რიცხვებით W_2 და W_3 არიან ბოგას მხრების გრაგნილები. გრაგნილების შესაბამისი ომური წინაღობებია: R_1, R_2 და R_3 . მუქი წერტილებით მონიშნულია გრაგნილების ერთსახელა მომჭერები. ერთსახელა მომჭერები ისეთი მომჭერებია, რომლებშიც დენების ერთნაირი მიმართულების დროს თვითინდუქციისა და ურთიერთინდუქციის ნაკადები მიმართულებით ერთმანეთს ემთხვევა.

ტრანსფორმატორის მოქმედების პრინციპიდან გამომდინარე, თუ პირველად გრაგნილში დენი მიმართულია ერთსახელა მომჭერისკენ, მაშინ მეორეულ გრაგნილში (ან გრაგნილებში) დენი (ან დენები) გამოდის (ან გამოდიან) ერთსახელა მომჭერიდან, რაც დამტკიცებულია ექსპერიმენტით [35].

როგორც ცნობილია, კოჭაში გამავალი დენი და მის მიერ შექმნილი მაგნიტური ნაკადი ერთმანეთთან დაკავშირებულია მარჯვენა ბურღის წესით, რომელიც სწორი გამტარისათვის შემდეგში მდგომარეობს: თუ ბურღის წვეროს გადაადგილების მიმართულება ემთხვევა დენის მიმართულებას, მაშინ ბურღის ტარის მოძრაობის მიმართულება ემთხვევა ნაკადის მიმართულებას; ხოლო წრიული

გამტარისათვის იგი შემდეგნაირად ჩამოყალიბდება: თუ წრიულ გამტარში გამავალი დენის მიმართულება ემთხვევა ბურღის ტარის მოძრაობის მიმართულებას, მაშინ ბურღის წვეროს გადაადგილების მიმართულება ემთხვევა ნაკადის მიმართულებას. ამ წესის გათვალისწინებით ნახ.2.11.ა-ზე მოცემული სამგრაგნილიანი საზომი ტრანსფორმატორის სქემის მუშაობას ფიზიკურად შეესაბამება ნახ.2.11.ბ-ზე წარმოდგენილი ნაკადების მიმართულება. ნაკადების მიმართულება განსაზღვრავს ძაბვების მიმართულებას.



ნახ.2.11 ა) სამგრაგნილიანი საზომი ტრანსფორმატორის სქემა; ბ) ნაკადების მიმართულება.

ნახ.2.11.ბ-ზე $\phi_{11}=L_{11}i_1$; $\phi_{22}=L_{22}i_2$; $\phi_{33}=L_{33}i_3$ - წარმოდგენენ თვითინდუქციის ნაკადებს, რომლებიც განისაზღვრებიან ამ კონტურებში გამავალი დენებით.

გამოსახულებებში მოცემული L_{11}, L_{22}, L_{33} კოეფიციენტები განისაზღვრებიან გრაგნილების სვიათა რიცხვებითა და მაგნიტური გამტარის მასალითა და ზომებით შემდეგნაირად: $L_{11} = W_1^2 \lambda$; $L_{22} = W_2^2 \lambda$; $L_{33} = W_3^2 \lambda$; სადაც λ მაგნიტური გამტარის გამტარობაა და განისაზღვრება ფორმულით: $\lambda = \mu \mu_0 S / l$, სადაც μ - მაგნიტური გამტარის მასალის ფარდობითი მაგნიტური შედწვევადობაა და მისი მნიშვნელობა აიღება სპეციალური ცხრილებიდან; μ_0 - მაგნიტური მუდმივაა და ტოლია $4\pi 10^{-7}$ ჰნ/მ, S -მაგნიტური გამტარის განივკვეთია - მ²; l - მაგნიტური გამტარის საშუალო სიგრძე - მ.

$\phi_{12} = M_{12}i_2$; $\phi_{21} = M_{21}i_1$; $\phi_{13} = M_{13}i_3$; $\phi_{31} = M_{31}i_1$; $\phi_{23} = M_{23}i_3$; $\phi_{32} = M_{32}i_2$ - წარმოდგენენ ურთიერთინდუქციის ნაკადებს,

რომლებიც განისაზღვრებიან მეზობელ კონტურებში გამავალი დენებით. მაგ: $\phi_{12} = M_{12}i_2$ – არის პირველ კონტურში, მეორე კონტურში გამავალი დენის მიერ შექმნილი ნაკადი და ა.შ.

M– მნიშვნელობებიც განისაზღვრებიან ხვიათა რიცხვებითა და მაგნიტური გამტარობით: $M_{12} = M_{21} = W_1W_2\lambda$; $M_{13} = M_{31} = W_1W_3\lambda$; $M_{23} = M_{32} = W_2W_3\lambda$;

კოჭებში ძაბვები და ნაკადები ერთმანეთთან დაკავშირებულნი არიან ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონით შემდეგნაირად:

$$U_L = \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt}; U_M = \frac{d\phi}{dt} = \pm M \frac{di}{dt};$$

გარდა ნაკადების მიმართულებისა, [36] თანახმად უნდა ავირჩიოთ ათვლის სისტემის მიმართულებაც. ათვლის სისტემის მიმართულებად ავიღოთ ϕ_{11} ნაკადის მიმართულება. ყოველივე ზემოთმოყვანილის გათვალისწინებით, აღნიშნული მიმართულებისათვის ნახ.2.11 მოცემული სქემის მიხედვით, კირხჰოფის მეორე კანონის თანახმად სამგრაგნილიანი ბოგირის მათემატიკური მოდელი გამოისახება შემდეგი დიფერენციალური განტოლებათა სისტემით:

$$(2.70) \quad \begin{cases} U_1 = R_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} - M_{12} \frac{di_2}{dt} - M_{13} \frac{di_3}{dt} \\ 0 = -(R_2 + R_x) i_2 - L_{22} \frac{di_2}{dt} - M_{21} \frac{di_1}{dt} - M_{23} \frac{di_3}{dt} \\ 0 = -(R_3 + R_0) i_3 - L_{33} \frac{di_3}{dt} - M_{31} \frac{di_1}{dt} - M_{32} \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$

კომპლექსური მეთოდით მიღებულ განტოლებათა სისტემა შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\begin{cases} \dot{U} = \underline{Z}_1 \dot{I}_1 - j\omega M_{12} \dot{I}_2 - j\omega M_{13} \dot{I}_3 \\ 0 = j\omega M_{21} \dot{I}_1 - \underline{Z}_2 \dot{I}_2 - j\omega M_{23} \dot{I}_3 \\ 0 = j\omega M_{31} \dot{I}_1 - j\omega M_{23} \dot{I}_3 - \underline{Z}_3 \dot{I}_2 \end{cases} \quad (2.71)$$

სადაც, $\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_{11}$; $\underline{Z}_2 = (R_2 + R_x) + j\omega L_{22}$; $\underline{Z}_3 = (R_3 + R_0) + j\omega L_{33}$;

ბოგირის წონასწორობის მდგომარეობაში გალვანომეტრში გამავალი დენები ტოლია:

$$I_2 = I_3 \quad (2.72)$$

ეს დენები განისაზღვრებიან შემდეგნაირად:

$$i_2 = \dot{U} \frac{\Delta_{12}}{\Delta}; \quad i_3 = \dot{U} \frac{\Delta_{13}}{\Delta} \quad (2.73)$$

სადაც,
$$\Delta = \begin{vmatrix} Z_1 & -j\omega M_{12} & -j\omega M_{13} \\ j\omega M_{21} & -Z_2 & j\omega M_{23} \\ j\omega M_{31} & -j\omega M_{23} & -Z_3 \end{vmatrix}; \quad (2.74)$$

$$\Delta_{12} = \begin{vmatrix} j\omega M_{21} & -j\omega M_{23} \\ j\omega M_{13} & -Z_1 \end{vmatrix} \times (-1)^3; \quad \Delta_{13} = \begin{vmatrix} j\omega M_{21} & -Z_2 \\ j\omega M_{13} & -j\omega M_{32} \end{vmatrix} \quad (2.75)$$

(2.72) და (2.73) გამოსახულებების შედარება გვაძლევს შემდეგ ტოლობას:

$\Delta_{12} = \Delta_{13}$

აქედან გამომდინარე, სათანადო მათემატიკური მოქმედებების ჩატარების შემდეგ მიიღება გასაზომი წინააღმდეგობის საანგარიშო ფორმულა:

$$R_x = [(R_3 + R_0)W_2/W_2] - R_2$$

წრფივი ელექტრული წრეების თეორიის საფუძველზე მიღებული იქნა სამგრაფნილიან ტრანსფორმატორულ ბოგირში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების შესაბამისი ერთადერთი სწორი მათემატიკური მოდელი.

თავი III. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების სქემების შედარებითი ანალიზი

წინა თავებში განხილული იყო კონკურენტუნარიანი სქემები, ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრებისათვის შემუშავებული სტატიკური მახასიათებლები და სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკური მოდელები, რომლებიც დაფუძნებულია უშუალო შეფასებისა და გაზომვის კომპენსაციური მეთოდის გამოყენებაზე. შემუშავებულია ძირითადი ღირსებები, ნაკლებოვანებანი და მრეწველობაში ხელსაწყოების გამოყენების შესაძლო სფეროები, რომლებიც ამ სქემების რეალიზებას ახდენენ.

ამ თავში სტატიკური მახასიათებლების მიღებული მათემატიკური მოდელების საფუძველზე გამოვლენილია კონდუქტომეტრული სტრუქტურების რაოდენობრივი და ხარისხობრივი მაჩვენებლები, ისეთები როგორებიცაა: მგრძნობიარობა, საშუალოკვადრატული ცდომილება. გარდა ამისა, ჩატარებულია კონდუქტომეტრის სტრუქტურული და პარამეტრული ოპტიმიზაცია, ხოლო შედარებით პერსპექტიული სქემისათვის შესრულებულია განხილული სქემების შედარებითი ანალიზი.

3.1. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების მზომი სქემების სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკური მოდელების მგრძნობიარობის განსაზღვრა

თუ (2.44) განტოლებიდან ავიღებთ პირველი რიგის წარმოებულს კუთრი ელექტროგამტარებლობის მიხედვით, მივიღებთ მგრძნობიარობას აქტიური მდგენელის მიმართ ნახ.2.3ა სქემაზე გამოსახული ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრისათვის, სადაც ინფორმაციულ პარამეტრად გვევლინება ძაბვა:

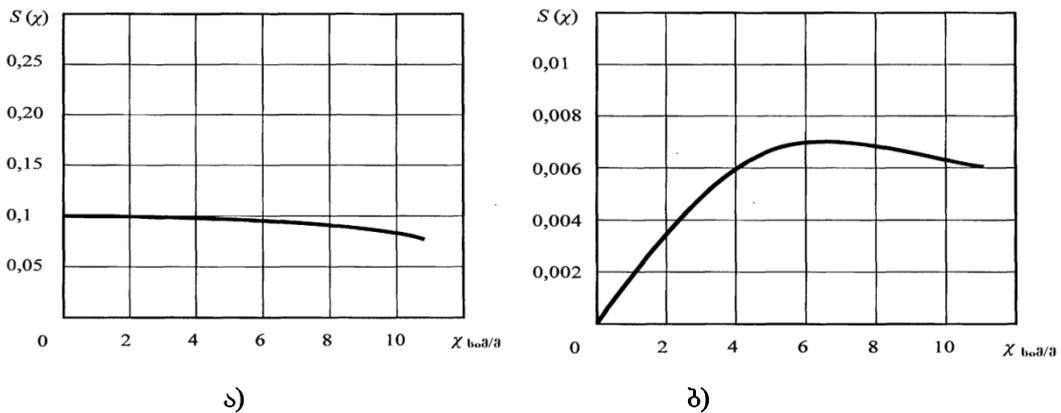
$$\frac{d}{d\chi} \left(A \frac{\chi}{A^2 + \omega^2 L_1^2 \chi^2} \right) \rightarrow \frac{A}{A^2 + \omega^2 L_1^2 \chi^2} - 2A \frac{\chi^2}{A^2 + \omega^2 L_1^2 \chi^2} \omega^2 L_1^2 \quad (3.1)$$

გამარტივების შემდეგ გვექნება:

$$S(\chi) = \frac{A^3 - A\omega^2 L_1^2 \chi^2}{A^4 + 2A^2\omega^2 L_1^2 \chi^2 + \omega^4 L_1^4 \chi^4} \quad (3.2)$$

(3.2) განტოლება წარმოადგენს ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის მგრძობიარობის მათემატიკურ მოდელს ძაბვის აქტიური მდგენელის მიმართ. იმ შემთხვევისათვის, როცა ინფორმაციული პარამეტრია ძაბვა, მაშინ ძაბვის აქტიური მდგენელის მგრძობიარობის ელექტროგამტარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი წარმოდგენილია ნახ.3.1.ა-ზე.

(3.2) გამოსახულება რთულია და არ იძლევა კონკრეტულ პასუხს კითხვაზე თუ რომელი პარამეტრია ძირითადი, ამიტომ მაღალი მგრძობიარობა არაერთმნიშვნელოვანია და დამოკიდებულია კონკრეტულ გარდამქმნელზე, რომელიც დამკვეთისთვისაა საჭირო.



ნახ.3.1. ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრისათვის: ა- ძაბვის აქტიური და ბ- ძაბვის რეაქტიული მდგენელების მგრძობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1- 10 სიმ/მ დიაპაზონში.

მსგავსი მეთოდით გამოვთვალოთ მგრძობიარობა დარჩენილი სქემებისათვისაც.

მგრძობიარობა ძაბვის რეაქტიული მდგენელისათვის ტოლია:

$$S(\chi) = \frac{2L_1 A^2 \chi}{(A^2 + \omega^2 L_1^2 \chi^2)^2} \quad (3.3)$$

ხოლო, ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის მგრძობიარობის ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი ძაბვის რეაქტიულ მდგენელისათვის გამოსახულია ნახ.3.1.ბ-ზე.

როგორც ნახ.3.1.ა-დან ჩანს, რომ თუ ინფორმაციული პარამეტრია ძაბვა, მაშინ მგრძობიარობის მიხედვით ხელსაწყოს

ოპტიმიზაციისათვის სასურველია გამოვიყენოთ სტატიკური მახასიათებლის ძაბვის აქტიური მდგენელის მათემატიკური მოდელი.

ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრისათვის აქტიური მდგენელის მიხედვით, რომლის ინფორმაციული პარამეტრია დენი, მგრძნობიარობას აქვს შემდეგი სახე:

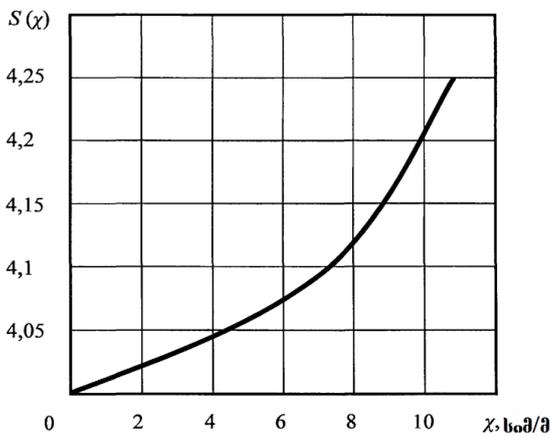
$$S(\chi) = \frac{M_{1,2}^2 A (2\omega^3 M_{1,2}^2 L_2 \chi^2 - L_1 \omega^2 L_2^2 \chi^2 + L_1 A^2)}{(2\omega^3 M_{1,2}^2 L_2 \chi^2 - L_1 \omega^2 L_2^2 \chi^2 + L_1 A^2)^2 L_1} \quad (3.4)$$

ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის მგრძნობიარობის ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი დენის აქტიური მდგენელისათვის გამოსახულია ნახ.3.2.ა-ზე.

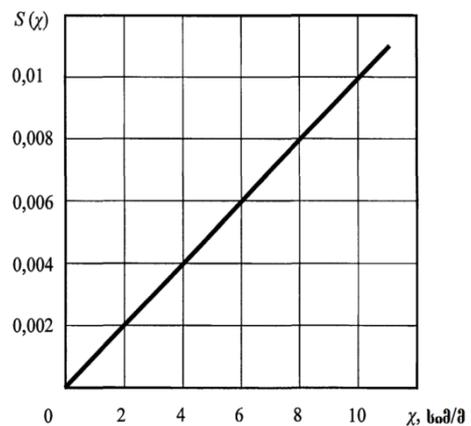
ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის მგრძნობიარობის მათემატიკური მოდელი დენის რეაქტიული მდგენელისათვის გამოსახება შემდეგნაირად:

$$S(\chi) = \frac{2\omega\chi M_{1,2}^2 L_2 A^2}{(2\omega^3 M_{1,2}^2 L_2 \chi^2 - L_1 \omega^2 L_2^2 \chi^2 - L_1 A^2)^2} \quad (3.5)$$

მგრძნობიარობის დამოკიდებულების გრაფიკი კუთრ ელექტროგამტარებლობაზე წარმოდგენილია ნახ.3.2.ბ-ზე



ა)



ბ)

ნახ.3.2. ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრისათვის: ა- დენის აქტიური და ბ- დენის რეაქტიული მდგენელების მგრძნობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1- 10 სიმ/მ დიაპაზონში.

როგორც ნახ.3.2.ა-დან ჩანს, რომ თუ ინფორმაციული პარამეტრია დენი, მაშინ მგრძნობიარობის მიხედვით ხელსაწყოს ოპტიმიზაციისათვის

სასურველია გამოვიყენოთ სტატიკური მახასიათებლის დენის აქტიური მდგენელის მათემატიკური მოდელი.

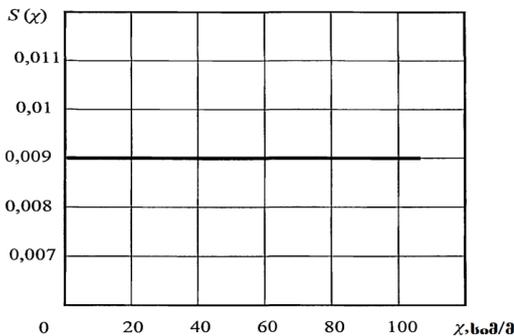
ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის შემთხვევაში, თუ ინფორმაციული პარამეტრია დენი, მაშინ დენის აქტიური მდგენელისათვის მგრძნობიარობა გამოისახება ფორმულით:

$$S(\chi) = \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{A L_1 L_4} \quad (3.6)$$

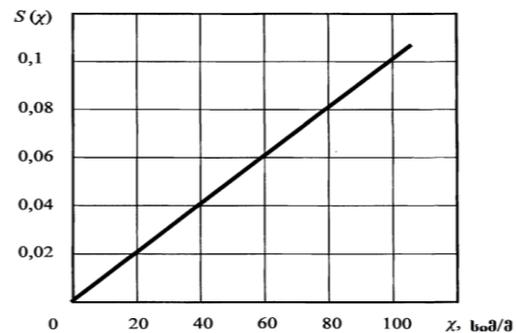
სადაც U_1 – ძაბვაა პირველი ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილში. დენის რეაქტიული მდგენელისათვის მგრძნობიარობა გამოისახება ფორმულით:

$$S(\chi) = \frac{2U_1 M_{1,2} M_{3,4} L \chi \Sigma}{A^2 L_1 L_4} \chi \quad (3.7)$$

თუ ინფორმაციული პარამეტრია დენი, მაშინ ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის მგრძნობიარობის ელექტროგამტარობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი დენის აქტიური და რეაქტიულ მდგენელისათვის გამოისახულია ნახ.3.3.-ზე.



ა)



ბ)

ნახ.3.3.. ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრისათვის: ა- დენის აქტიური და ბ- დენის რეაქტიული მდგენელების მგრძნობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1- 10 სიმ/მ დიაპაზონში.

ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის შემთხვევაში, თუ ინფორმაციული პარამეტრია ძაბვა, მაშინ ძაბვის აქტიური მდგენელისათვის მგრძნობიარობა გამოისახება ფორმულით:

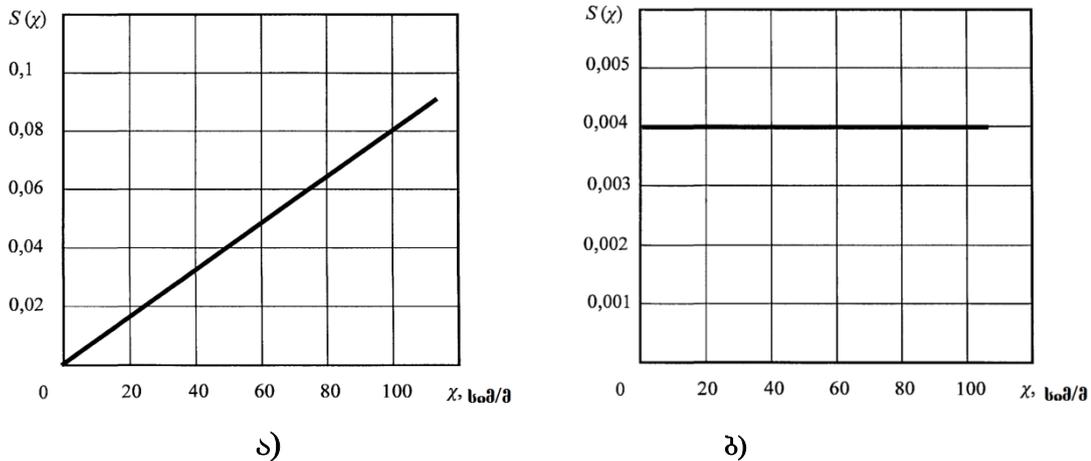
$$S(\chi) = \frac{2U_1 \omega^2 M_{1,2} M_{3,4} L \chi \Sigma}{A^2 L_1} \chi \quad (3.8)$$

მგრძობიარობის დამოკიდებულების გრაფიკი, აქტიური მდგენელის ძაბვის მიხედვით, კუთრ ელექტროგამტარებლობაზე, გამოსახულია ნახ.3.7

სოლო რეაქტიული მდგენელისათვის გამოსახება ფორმულით:

$$S(\chi) = \frac{U_1 M_{1,2} M_{2,3}}{AL_1} \quad (3.9)$$

როცა ინფორმაციული პარამეტრია ძაბვა, მაშინ ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის მგრძობიარობის ელექტროგამტარებლობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი ძაბვის აქტიური და რეაქტიულ მდგენელისათვის გამოსახულია ნახ.3.4.-ზე



ნახ.3.4.. ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრისათვის: ა- ძაბვის აქტიური და ბ- ძაბვის რეაქტიული მდგენელების მგრძობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1- 100 სიმ/მ დიაპაზონში.

როგორც ნახ.3.3 და ნახ.3.4-ზე წარმოდგენილი გრაფიკებიდან ჩანს, ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრებისათვის უმჯობესია გაზომვები ჩავატაროთ დენის აქტიური მდგენელის და ძაბვის რეაქტიული მდგენელის მიხედვით, რადგანაც მგრძობიარობა ამ მდგენელებისათვის მუდმივია და წრფივია კონდუქტომეტრის გაზომვების მთელ დიაპაზონზე.

ორტრანსფორმატორიანი ოთხგრაგნილიანი კონდუქტომეტრის შემთხვევაში, თუ ინფორმაციული პარამეტრია დენი, მაშინ დენის აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისათვის მგრძობიარობა ერთნაირია და გამოსახება ფორმულით:

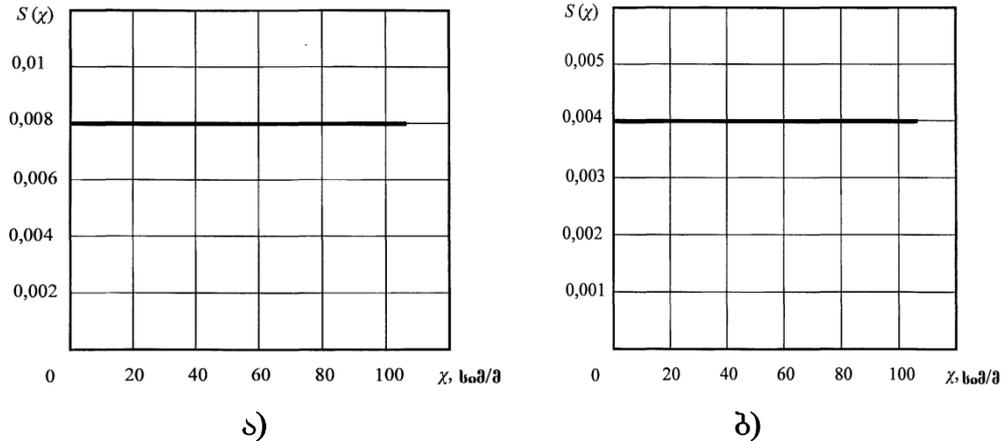
$$S(\chi) = \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{AL_1 L_4} \quad (3.10)$$

შესაბამისი გრაფიკი წარმოდგენილია ნახ.3.5.ა-ზე.

ინფორმაციული პარამეტრია ძაბვა, მაშინ ძაბვის აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისათვის მგრძობიარობა ასევე ერთნაირია და გამოსახება ფორმულით:

$$S(\chi) = \frac{U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{AL_1} \quad (3.11)$$

შესაბამისი გრაფიკი წარმოდგენილია ნახ.3.5.ბ-ზე.



ნახ.3.5. ორტრანსფორმატორიანი ოთხგრაგნილიანი კონდუქტომეტრისათვის: ა- დენისა და ბ-ძაბვის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების მგრძობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1-100 სმ/მ დიაპაზონში.

როგორც ნახ.3.5.ზე წარმოდგენილი გრაფიკებიდან ჩანს, ორტრანსფორმატორიანი ოთხგრაგნილიანი კონდუქტომეტრების შემთხვევაში როცა ინფორმაციული პარამეტრია დენი, მაშინ მგრძობიარობა უფრო მაღალია, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როცა ინფორმაციული პარამეტრია ძაბვა. აქედან შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ მაღალი მგრძობიარობის მისაღწევად სასურველია გამოვიყენოთ ნახ.2.3ვ-ზე წარმოდგენილი სქემები.

ორტრანსფორმატორიანი სამგრაგნილიანი კონდუქტომეტრის შემთხვევაში, თუ ინფორმაციული პარამეტრია დენი, მაშინ დენის აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისათვის მგრძობიარობა ასევე ერთნაირია და გამოსახება ფორმულით

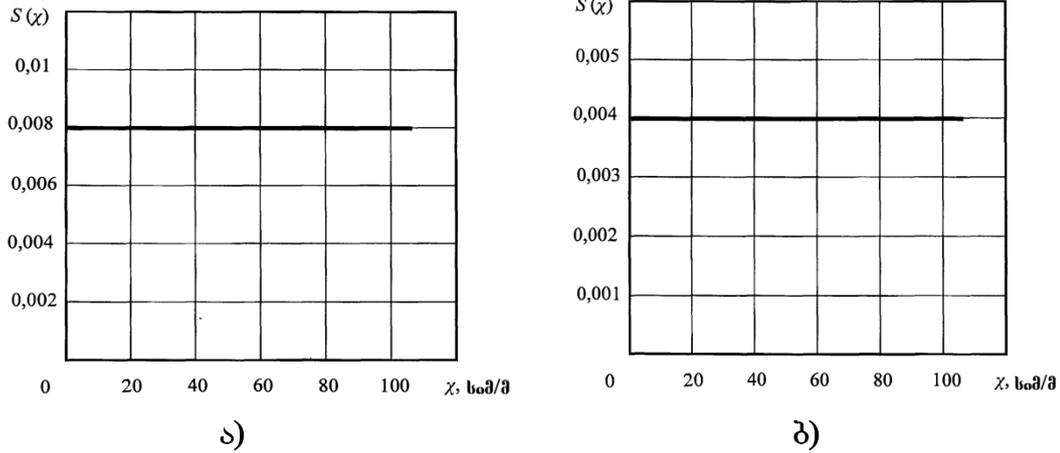
$$S(\chi) = \frac{U_1 M_{1,2} M_{2,4}}{AL_1 L_4} \quad (3.12)$$

შესაბამისი გრაფიკი წარმოდგენილია ნახ.3.6.ა-ზე.

ინფორმაციული პარამეტრია ძაბვა, მაშინ ძაბვის აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისათვის მგრძობიარობა ასევე ერთნაირია და გამოისახება ფორმულით:

$$S(\chi) = \frac{U_1 M_{1,2} M_{2,4}}{AL_1} \quad (3.13)$$

შესაბამისი გრაფიკი წარმოდგენილია ნახ.3.6.ბ-ზე.



ნახ.3.6. ორტრანსფორმატორიანი სამგრაგნილიანი კონდუქტომეტრისათვის: ა-დენისა და ბ-ძაბვის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების მგრძობიარობის გაზომვის დიაპაზონზე დამოკიდებულების გრაფიკი 0,1- 100 სმ/მ დიაპაზონში

როგორც ნახ.3.6.ზე წარმოდგენილი გრაფიკებიდან ჩანს, ორტრანსფორმატორიანი სამგრაგნილიანი კონდუქტომეტრების შემთხვევაში როცა ინფორმაციული პარამეტრია დენი, მაშინ მგრძობიარობა უფრო მაღალია, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როცა ინფორმაციული პარამეტრია ძაბვა. აქედან შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ მაღალი მგრძობიარობის მისაღწევად სასურველია გამოვიყენოთ ნახ.2.3.თ-ზე წარმოდგენილი სქემები.

3.2. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების საბაზო სქემების ცდომილებების მოდელები

ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრები ვერ უწევენ კონკურენციას ორტრანსფორმატორიან სქემებს, სტატიკური მახასიათებლებისა და ცვლადი მგრძნობიარობების გამო. ერთტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრების ცდომილებების გამოთვლა მოყვანილი იყო პირველ თავში, მეორე თავში აღწერილია ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრების ცდომილებების მოდელები ძაბვის მიხედვით აქტიური მდგენელებისათვის.

განვსაზღვროთ შემთხვევითი გადახრა W სიგნალის $-\Delta W, \overline{W}^{\wedge}$ ნორმალურიდან, მაშინ 2.5 ფორმულიდან მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \Delta W = & \frac{2\omega U_1 M_{1,2} M_{3,4} L_{\chi\Sigma} \chi^2}{L_1 A^2} \Delta\omega + \frac{\omega^2 M_{1,2} M_{3,4} L_{\chi\Sigma} \chi^2}{L_1 A^2} \Delta U_1 + \frac{\omega^2 U_1 M_{3,4} L_{\chi\Sigma} \chi^2}{L_1 A^2} \Delta M_{1,2} \\ & + \frac{\omega^2 U_1 M_{1,2} L_{\chi\Sigma} \chi^2}{L_1 A^2} \Delta M_{3,4} + \frac{\omega^2 U_1 M_{1,2} M_{3,4} \chi^2}{L_1 A^2} \Delta L_{\chi\Sigma} - \frac{\omega^2 U_1 M_{1,2} M_{3,4} L_{\chi\Sigma} \chi^2}{L_1^2 A^2} \Delta L_1 - \\ & - \frac{2\omega^2 U_1 M_{1,2} M_{3,4} L_{\chi\Sigma} \chi^2}{L_1 A^3} \Delta A \end{aligned} \quad (3.14)$$

(2.6) ფორმულის გამოყენებით, განვსაზღვროთ სტატიკური მახასიათებლის მათემატიკური მოდელის აბსოლუტური ცდომილება:

$$\begin{aligned} \Delta X = \frac{\Delta W}{S(X)} = & \frac{\chi}{\omega} \Delta\omega + \frac{\chi}{2U_1} \Delta U_1 + \frac{\chi}{2M_{1,2}} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi}{2M_{3,4}} \Delta M_{3,4} + \frac{\chi}{2L_{\chi\Sigma}} \Delta L_{\chi\Sigma} \\ & - \frac{\chi}{2L_1} \Delta L_1 - \frac{\chi}{2A} \Delta A \end{aligned} \quad (3.15)$$

ΔX აბსოლუტური ცდომილებიდან X ნორმირებულზე გადასვლისას, გაზომვის ამ $(X_{min} \leq X \leq X_{max})$ დიაპაზონზე, დაყვანილი δX ცდომილებისთვის მივიღებთ:

$$\delta X = 0,5\chi(2\delta\omega + \delta U_1 + \delta M_{1,2} + \delta M_{3,4} - \delta L_{\chi\Sigma} - \delta L_1 - 2\delta A) \quad (3.16)$$

ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის საშუალოკვადრატული ცდომილება, ძაბვის მიხედვით აქტიური მდგენელისა, ტოლია:

$$\sigma = \sqrt{0,25\chi^2(4\sigma_\omega^2 + \sigma_{U_1}^2 + \sigma_{M_{1,2}}^2 + \sigma_{M_{3,4}}^2 - \sigma_{L_{\chi\Sigma}}^2 - \sigma_{L_1}^2 - 4\sigma_A^2)} \quad (3.17)$$

მსგავსი მეთოდით გამოვთვალოთ ცდომილებების მოდელები, ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების დარჩენილი სქემებისათვის.

ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის რეაქტიული მდგენელისათვის, ძაბვის მიხედვით ინფორმაციული პარამეტრით, შემთხვევითი გადახრა ΔW ტოლია:

$$\Delta W = \frac{\chi M_{1,2} M_{2,3}}{L_1 A} \Delta U_1 + \frac{\chi U_1 M_{2,3}}{L_1 A} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi U_1 M_{1,2}}{L_1 A} \Delta M_{2,3} - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{2,3}}{L_1^2 A} \Delta L_1 - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{2,3}}{L_1 A^2} \Delta A. \quad (3.18)$$

სტატიკური მახასიათებლის მათემატიკური მოდელის აბსოლუტური ცდომილება ტოლია:

$$\Delta X = \frac{\chi}{U_1} \Delta U_1 + \frac{\chi}{M_{1,2}} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi}{M_{2,3}} \Delta M_{2,3} - \frac{\chi}{L_1} \Delta L_1 - \frac{\chi}{A} \Delta A \quad (3.19)$$

გაზომვის დაყვანილი ცდომილება ტოლია:

$$\delta X = \chi (\delta U_1 + \delta M_{1,2} + \delta M_{2,3} - \delta L_1 - \delta A) \quad (3.20)$$

ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის საშუალო კვადრატული ცდომილება რეაქტიული მდგენელისათვის ძაბვის მიხედვით ტოლია:

$$\sigma = \sqrt{\chi^2 (\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{M_{1,2}}^2 + \sigma_{M_{2,3}}^2 - \sigma_{L_1}^2 - \sigma_A^2)} \quad (3.21)$$

ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის აქტიული მდგენელისათვის, დენის მიხედვით ინფორმაციული პარამეტრით, შემთხვევითი გადახრა ΔW ტოლია:

$$\Delta W = \frac{\chi M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 L_4 A} \Delta U_1 + \frac{\chi U_1 M_{3,4}}{L_1 L_4 A} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi U_1 M_{1,2}}{L_1 L_4 A} \Delta M_{3,4} - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1^2 L_4 A} \Delta L_1 - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 L_4^2 A} \Delta L_4 - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 L_4 A^2} \Delta A \quad (3.22)$$

სტატიკური მახასიათებლის მათემატიკური მოდელის აბსოლუტური ცდომილება ტოლია:

$$\Delta X = \frac{\chi}{U_1} \Delta U_1 + \frac{\chi}{M_{1,2}} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi}{M_{3,4}} \Delta M_{3,4} - \frac{\chi}{L_1} \Delta L_1 - \frac{\chi}{L_4} \Delta L_4 - \frac{\chi}{A} \Delta A \quad (3.23)$$

გაზომვის დაყვანილი ცდომილება ტოლია:

$$\delta X = \chi (\delta U_1 + \delta M_{1,2} + \delta M_{3,4} - \delta L_1 - \delta L_4 - \delta A) \quad (3.24)$$

ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის საშუალო კვადრატული ცდომილება აქტიური მდგენელისათვის დენის მიხედვით ტოლია:

$$\sigma = \sqrt{\chi^2(\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{M_{1,2}}^2 + \sigma_{M_{3,4}}^2 - \sigma_{L_1}^2 - \sigma_{L_4}^2 - \sigma_A^2)} \quad (3.25)$$

ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის რეაქტიული მდგენელისათვის, დენის მიხედვით ინფორმაციული პარამეტრით, შემთხვევითი გადახრა ΔW ტოლია:

$$\begin{aligned} \Delta W = & \frac{M_{1,2}M_{3,4}L_{\chi\Sigma}\chi^2}{L_1L_4A^2}\Delta U_1 + \frac{U_1M_{3,4}L_{\chi\Sigma}\chi^2}{L_1L_4A^2}\Delta M_{1,2} + \frac{U_1M_{1,2}L_{\chi\Sigma}\chi^2}{L_1L_4A^2}\Delta M_{3,4} + \\ & + \frac{U_1M_{1,2}M_{3,4}\chi^2}{L_1L_4A^2}\Delta L_{\chi\Sigma} - \frac{U_1M_{1,2}M_{3,4}L_{\chi\Sigma}\chi^2}{L_1^2L_4A^2}\Delta L_1 - \frac{U_1M_{1,2}M_{3,4}L_{\chi\Sigma}\chi^2}{L_1L_4^2A^2}\Delta L_4 \\ & - \frac{2U_1M_{1,2}M_{3,4}L_{\chi\Sigma}\chi^2}{L_1L_4A^3}\Delta A \end{aligned} \quad (3.26)$$

სტატიკური მახასიათებლის მათემატიკური მოდელის აბსოლუტური ცდომილება ტოლია:

$$\begin{aligned} \Delta X = & \frac{\chi}{2U_1}\Delta U_1 + \frac{\chi}{2M_{1,2}}\Delta M_{1,2} + \frac{\chi}{2M_{3,4}}\Delta M_{3,4} + \frac{\chi}{2L_{\chi\Sigma}}\Delta L_{\chi\Sigma} - \frac{\chi}{2L_1}\Delta L_1 - \frac{\chi}{2L_4}\Delta L_4 \\ & + \frac{\chi}{A}\Delta A. \end{aligned} \quad (3.27)$$

გაზომვის დაყვანილი ცდომილება ტოლია:

$$\delta X = 0,5\chi(\delta U_1 + \delta M_{1,2} + \delta M_{3,4} + \delta L_{\chi\Sigma} - \delta L_1 - \delta L_4 - 2\delta A) \quad (3.28)$$

ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის საშუალო კვადრატული ცდომილება რეაქტიული მდგენელისათვის დენის მიხედვით ტოლია:

$$\sigma = \sqrt{0,25\chi^2(\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{M_{1,2}}^2 + \sigma_{M_{3,4}}^2 - \sigma_{L_{\chi\Sigma}}^2 - \sigma_{L_1}^2 - \sigma_{L_4}^2 - 4\sigma_A^2)} \quad (3.29)$$

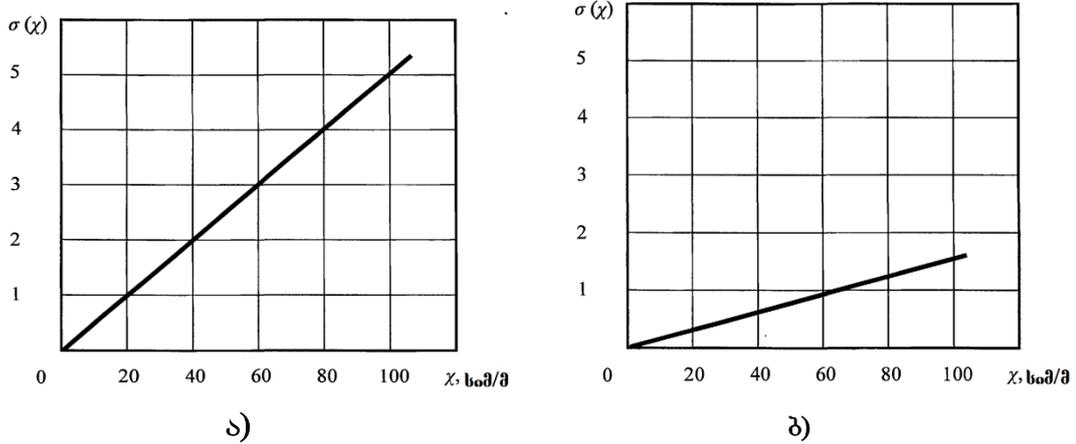
ოთხგრანულიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის აქტიური და რეაქტიული მდგენელების, ინფორმაციული პარამეტრით ძაბვის მიხედვით, საშუალოკვადრატული ცდომილების დამოკიდებულების გრაფიკი კუთრ ვლექტროგამტარებლობაზე, გამოსახულია ნახ.3.7.ა-ზე.

იმდენად რამდენადაც, ოთხგრანულიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის სქემის სტატიკური მახასიათებელი, აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისა ინფორმაციული პარამეტრით ძაბვის

მიხედვით, ერთნაირია, მაშინ ცდომილებების მოდელიც ასევე ერთნაირი იქნება.

შემთხვევითი გადახრა ΔW ტოლია:

$$\Delta W = \frac{\chi M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 A} \Delta U_1 + \frac{\chi U_1 M_{3,4}}{L_1 A} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi U_1 M_{1,2}}{L_1 A} \Delta M_{3,4} - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1^2 A} \Delta L_1 - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 A^2} \Delta A \quad (3.30)$$



ნახ. 3.7. კონდუქტომეტრის საშუალო კვადრატული ცდომილების დამოკიდებულების გრაფიკი: ა-ორტრანსფორმატორიანი კონდუქტომეტრის კუთრი ელექტროგამტარობისა დენის რეაქტიულ მდგენელზე; ბ-მრავალგრაგნილიანი კონდუქტომეტრის კუთრი ელექტროგამტარობისა ძაბვის აქტიურ და რეაქტიულ მდგენელებზე.

სტატიკური მახასიათებლის მათემატიკური მოდელის აბსოლუტური ცდომილება ტოლია:

$$\Delta X = \frac{\chi}{U_1} \Delta U_1 + \frac{\chi}{M_{1,2}} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi}{M_{3,4}} \Delta M_{3,4} - \frac{\chi}{L_1} \Delta L_1 - \frac{\chi}{A} \Delta A. \quad (3.31)$$

გაზომვის დაყვანილი ცდომილება ტოლია:

$$\delta X = \chi(\delta U_1 + \delta M_{1,2} + \delta M_{3,4} - \delta L_1 - \delta A) \quad (3.32)$$

ოთხგრაგნილიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის საშუალოკვადრატული ცდომილება, აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისათვის ძაბვის მიხედვით ტოლია:

$$\sigma = \sqrt{\chi^2(\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{M_{1,2}}^2 + \sigma_{M_{3,4}}^2 - \sigma_{L_1}^2 - \sigma_A^2)} \quad (3.33)$$

შემთხვევითი გადახრა ΔW ტოლია:

$$\Delta W = \frac{\chi M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 L_4 A} \Delta U_1 + \frac{\chi U_1 M_{3,4}}{L_1 L_4 A} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi U_1 M_{1,2}}{L_1 L_4 A} \Delta M_{3,4} - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_4^2 L_1 A} \Delta L_4 - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_4 L_1^2 A} \Delta L_1 - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{3,4}}{L_1 L_4 A^2} \Delta A \quad (3.34)$$

სტატიკური მახასიათებლის მათემატიკური მოდელის აბსოლუტური ცდომილება ტოლია:

$$\Delta X = \frac{\chi}{U_1} \Delta U_1 + \frac{\chi}{M_{1,2}} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi}{M_{3,4}} \Delta M_{3,4} - \frac{\chi}{L_4} \Delta L_4 - \frac{\chi}{L_1} \Delta L_1 - \frac{\chi}{A} \Delta A. \quad (3.35)$$

გაზომვის დაყვანილი ცდომილება ტოლია:

$$\delta X = \chi(\delta U_1 + \delta M_{1,2} + \delta M_{3,4} - \delta L_4 - \delta L_1 - \delta A) \quad (3.36)$$

ოთხგრანნილიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის საშუალოკვადრატული ცდომილება, აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისა დენის მიხედვით ტოლია:

$$\sigma = \sqrt{\chi^2(\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{M_{1,2}}^2 + \sigma_{M_{3,4}}^2 - \sigma_{L_4}^2 - \sigma_{L_1}^2 - \sigma_A^2)} \quad (3.37)$$

რადგანაც, სამგრანნილიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის სტატიკური მახასიათებელი აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისათვის, ინფორმაციული პარამეტრით ძაბვის მიხედვით ერთნაირია, ამიტომ ცდომილებების მოდელებიც ასევე ერთნაირი იქნება.

შემთხვევითი გადახრა ΔW ტოლია:

$$\Delta W = \frac{\chi M_{1,2} M_{2,4}}{L_1 A} \Delta U_1 + \frac{\chi U_1 M_{2,4}}{L_1 A} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi U_1 M_{1,2}}{L_1 A} \Delta M_{2,4} - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{2,4}}{L_1^2 A} \Delta L_1 - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{2,4}}{L_1 A^2} \Delta A \quad (3.38)$$

სტატიკური მახასიათებლის მათემატიკური მოდელის აბსოლუტური ცდომილება ტოლია:

$$\Delta X = \frac{\chi}{U_1} \Delta U_1 + \frac{\chi}{M_{1,2}} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi}{M_{2,4}} \Delta M_{2,4} - \frac{\chi}{L_1} \Delta L_1 - \frac{\chi}{A} \Delta A. \quad (3.39)$$

გაზომვის დაყვანილი ცდომილება ტოლია:

$$\delta X = \chi(\delta U_1 + \delta M_{1,2} + \delta M_{2,4} - \delta L_1 - \delta A) \quad (3.40)$$

სამგრანნილიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის საშუალოკვადრატული ცდომილება, აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისათვის ძაბვის მიხედვით ტოლია:

$$\sigma = \sqrt{\chi^2(\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{M_{1,2}}^2 + \sigma_{M_{2,4}}^2 - \sigma_{L_1}^2 - \sigma_A^2)} \quad (3.41)$$

რადგანაც, სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის სტატიკური მახასიათებელი აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისათვის, ინფორმაციული პარამეტრით დენის მიხედვით ერთნაირია, ამიტომ ცდომილებათა მოდელეებიც ერთნაირი იქნება.

შემთხვევითი გადახრა ΔW ტოლია:

$$\Delta W = \frac{\chi M_{1,2} M_{2,4}}{L_1 L_4 A} \Delta U_1 + \frac{\chi U_1 M_{2,4}}{L_1 L_4 A} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi U_1 M_{1,2}}{L_1 L_4 A} \Delta M_{2,4} - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{2,4}}{L_4^2 L_1 A} \Delta L_4 - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{2,4}}{L_4 L_1^2 A} \Delta L_1 - \frac{\chi U_1 M_{1,2} M_{2,4}}{L_1 L_4 A^2} \Delta A \quad (3.42)$$

გაზომვის აბსოლუტური ცდომილება ვიპოვოთ ფორმულიდან:

$$\Delta X = \frac{\chi}{U_1} \Delta U_1 + \frac{\chi}{M_{1,2}} \Delta M_{1,2} + \frac{\chi}{M_{2,4}} \Delta M_{2,4} - \frac{\chi}{L_4} \Delta L_4 - \frac{\chi}{L_1} \Delta L_1 - \frac{\chi}{A} \Delta A. \quad (3.43)$$

გაზომვის დაყვანილი ცდომილება ტოლია:

$$\delta X = \chi (\delta U_1 + \delta M_{1,2} + \delta M_{2,4} - \delta L_4 - \delta L_1 - \delta A) \quad (3.44)$$

სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის საშუალოკვადრატული ცდომილება, აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისათვის დენის მიხედვით ტოლია:

$$\sigma = \sqrt{\chi^2 (\sigma_{U_1}^2 + \sigma_{M_{1,2}}^2 + \sigma_{M_{2,4}}^2 - \sigma_{L_4}^2 - \sigma_{L_1}^2 - \sigma_A^2)} \quad (3.45)$$

3.3. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების პერსპექტიული სქემების შედარებითი ანალიზი, სტრუქტურული და პარამეტრული ოპტიმიზაცია.

ადრე განხილული ყველა მოდელიდან, რეალიზაციისათვის შედარებით პერსპექტიულად გვევლინება ის სქემები, რომლებიც იყენებენ გაზომვის კომპენსაციურ მეთოდს. ამჟამად ცნობილია ოთხი სქემა; შესაბამისი რეალიზაციისათვის მათგან უნდა აირჩეს ერთი. თუ ჩავთვლით, რომ ჩვენს შემთხვევაში ცდომილება წარმოადგენს მოქმედების რეზულტატს დიდი რიცხვფაქტორებით, ამასთან, თითოეული ფაქტორის როლი ზუსტი გაზომვების შემთხვევაში მცირეა. მზომ ხელსაწყოებში ხარისხის ერთ-ერთ ძირითად მაჩვენებლად გვევლინება ცდომილება. რაც მეტად მცირეა ცდომილება, მით

უკეთესია ხელსაწყო, ამიტომ შესაბამისი სქემის არჩევისათვის ვისარგებლოთ საშუალოკვადრატული ცდომილების მინიმალური მნიშვნელობის კრიტერიუმით. ასეთი არჩევანი არ არის შემთხვევითი. ჯერ ერთი, საშუალოკვადრატული ცდომილების მიხედვით მათემატიკური მოდელების ცდომილება შედარებით ხელსაყრელია ანალიზისთვის, მეორეც, სწორედ საშუალოკვადრატულ ცდომილებაშია ჩართული ხელსაწყოს ყველა მდგენელის ცდომილება, მესამე, საშუალოკვადრატული ცდომილება წარმოადგენს თვალსაჩინო მახასიათებელს თავად გაფანტვის სიდიდისა [32].

საშუალოკვადრატული ცდომილების მნიშვნელობანი გაზომვის ცნობილი 3.1 კომპენსაციური სქემებისათვის

ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის სამგრაგნილიანი სქემა				ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის ოთხგრაგნილიანი სქემა			
გაზომვები დენის მიხედვით		გაზომვები ძაბვის მიხედვით		გაზომვები დენის მიხედვით		გაზომვები ძაბვის მიხედვით	
აქტიური მდგენელი	რეაქტ. მდგენ.	აქტ. მდგენ.	რეაქტ. მდგენ.	აქტ.მდგენ.	რეაქტ.მდგ.	აქტ.მდგ	რეაქტ.მდგ.
0	0	1	1	0	0	1	1

გაზომვის პრაქტიკაში გვხვდება შემთხვევითი ცდომილებების განაწილების სხვადასხვა კანონები, ამასთან, მეტი მნიშვნელობა აქვს განაწილების ნორმალურ კანონს. ნორმალური კანონის მთავარი თავისებურება მდგომარეობს იმაში, რომ ის არის ზღვრული, ანუ მას უახლოვდებიან განაწილების სხვა კანონები, გაზომვის ტიპური პირობებისას. თუ ჩავთვლით, რომ ცდომილება წარმოადგენს დიდი რიცხვ-ფაქტორების მოქმედების შედეგს, ამასთან, თითოეული ფაქტორის როლი ზუსტი გაზომვების დროს მცირეა [8].

საშუალოკვადრატული ცდომილების კრიტერიუმი ახასიათებს განაწილების მრუდის ფორმას და ასრულებს გაფანტვის ცდომილების მზომის როლს. საშუალოკვადრატული ცდომილების შემცირებით იზრდება ალბათობა მცირე და, მცირდება ალბათობა დიდი შემთხვევითი ცდომილებებისა, რაც ზუსტი ანალიზური ტექნიკის პროექტირებისას წარმოადგენს ხარისხის შეფასების ოპტიმალურ კრიტერიუმს.

მზომი სქემის განსაზღვრისათვის, მინიმალური ცდომილებით, საშუალოკვადრატული ცდომილების მიხედვით, შემოვიფარგლოთ პირობით, რომ ყოველ მდგენელს გააჩნია ცდომილება 1% სხვა ტოლი პირობებისა, თანაც საუკეთესო სქემა იქნება ის, რომელსაც საშუალოკვადრატული ცდომილების მნიშვნელობა ექნება მინიმალური.

ცხრილი3.1. –დან ჩანს, რომ ცდომილების მდგენელების პირობითი მნიშვნელობების 1%, სქემები, რომლებშიც ინფორმაციული პარამეტრი დენია, იძლევიან საუკეთესო შედეგს.

ჩავატაროთ პარამეტრული ოპტიმიზაცია სქემებისათვის, დენის მიხედვით ინფორმაციული პარამეტრით. ამისათვის შემოვიფარგლოთ რეალური მნიშვნელობებით ცდომილების ყველა მდგენელისათვის:

$$U = 5 \div 15 \text{ (გ)}$$

$$M = 0,0001 \div 0,001 \text{ (ჰნ)}$$

$$L = 0,001 \div 0,005 \text{ (ჰნ)}$$

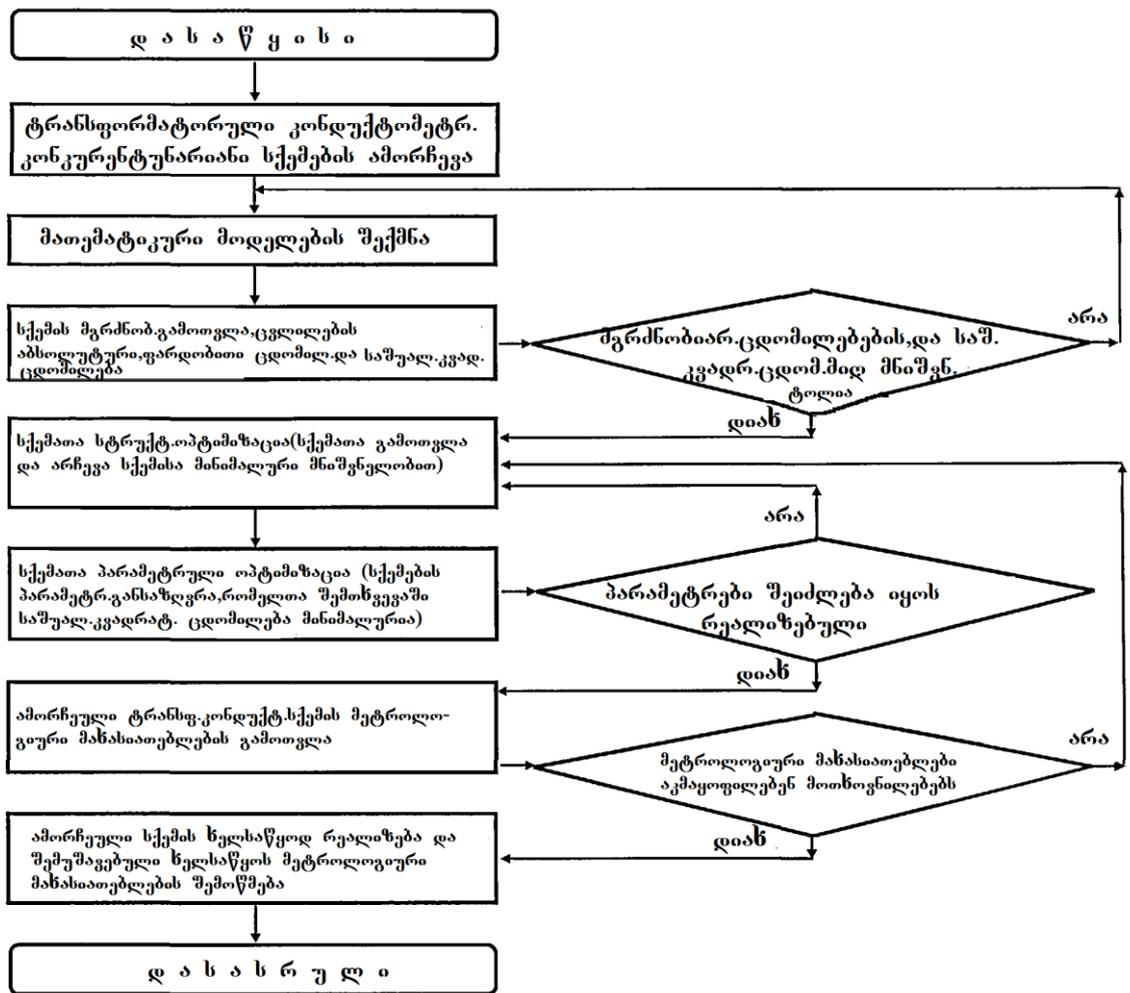
$$A = 0 \div 10$$

თუ ჩავსვამთ მოცემულ მნიშვნელობებს (3.35) და (3.45) ფორმულებში, დავინახავთ, რომ ცდომილების შემცირებისათვის აუცილებელია გავზარდოთ U და M პარამეტრების და შევამციროთ A -ს მნიშვნელობები;

საშუალო კვადრატული ცდომილების კრიტერიუმის საფუძველზე შემუშავებულია ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ოპტიმალური პროექტირების მეთოდიკა. მისი ბლოკ ალგორითმი მოცემულია ნახ.3.8.-ზე. სადაც გათვალისწინებულია:

1. ამორჩევა რამდენიმე კონკურენტუნარიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების სქემებისა, რომელთა დანიშნულებაა გაზომვის დასმული ამოცანის ამოხსნა.
2. კონკურენტუნარიანი სქემების მათემატიკური მოდელების შექმნა, ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ამორჩეული სქემების ელექტრული წრედების განსაკუთრებულობების გათვალისწინებით.

3. სქემების, მგრძობიარობის, გაზომვის აბსოლუტური, ფარდობითი ცდომილებების და საშუალოკვადრატული ცდომილების გამოთვლა.
4. სქემების სტრუქტურული ოპტიმიზაცია, რომელიც მდგომარეობს საშუალოკვადრატული ცდომილების მნიშვნელობის რიცხვობრივ გამოთვლაში ტოლი მნიშვნელობებისას, და იმ სქემების ამორჩევა, რომელნიც ფლობენ მინიმალურ საშუალოკვადრატულ ცდომილებას.
5. სქემის პარამეტრული ოპტიმიზაცია, რომლის არსი მდგომარეობს სქემის ისეთი პარამეტრების პოვნაში, რომელნიც ამ სქემის საშუალოკვადრატული ცდომილების მნიშვნელობის მინიმალიზირებას ახდენენ.
6. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ამორჩეული სქემის მეტროლოგიური მახასიათებლების გამოთვლა, მათემატიკური მოდელის და სქემის ოპტიმალური პარამეტრების მეშვეობით.
7. ამორჩეული ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრული სქემის ხელსაწყოთა რეალიზაცია და შემუშავებული ხელსაწყოს მეტროლოგიური მახასიათებლების შემოწმება.



ნახ.3.8. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ოპტიმალური პროექტირების ალგორითმის ბლოკ-სქემა.

მოცემული მეთოდიკა საშუალებას იძლევა შევადაროთ და ანალიზი გავუკეთოთ ამორჩეულ სქემებს, დამკვეთის მოთხოვნებზე და ხელსაწყოს მუშაობის პირობებზე დაყრდნობით.

თავი IV.
თხევადხვიანი კონდუქტომეტრების პირველადი
გარდამქმნელის (უჯრედის) ოპტიმალური ელექტრული და
მაგნიტური პარამეტრების განსაზღვრა.

4.1. ზოგადი ცნობები

როგორც ზემოთ მოყვანილმა ანალიზმა ცხადყო, უკონტაქტო ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრის მეთოდი დამყარებულია ელ.მაგნ. ველის მაღალსიხშირულ ურთიერთქმედებაზე, ამიტომ აუცილებელია განისაზღვროს საკვლევი სქემებისათვის სიხშირეების ოპტიმალური დიაპაზონი. ნახ.4.1-ზე წარმოდგენილია ერთ და ორტრანსფორმატორიანი სქემებისთვის, ძაბვის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი [33]. როგორც ამ გრაფიკიდან ჩანს, ერთტრანსფორმატორიანი სქემისათვის სიხშირეთა სამუშაო დიაპაზონი წარმოადგენს 50–200 კჰც შუალედს, ამასთან, გამოსავალი სიგნალი იქნება საკმარისად მაღალი. თუმცა, სიხშირის ამადლება შესაძლებელია მხოლოდ სიხშირეთა განსაზღვრულ დიაპაზონში, რადგან მაღალი სიხშირეებისას, კოჭას იმპედანსი მნიშვნელოვნად იზრდება; ასევე აუცილებელია გამტარების კარგი ეკრანიზირება.

ინდუქციური კოჭას სრული იმპედანსი შედგება აქტიური და რეაქტიული მდგენელებისაგან და ტოლია:

$$\hat{Z}_L(j\omega) = \sqrt{R^2 + X_p^2} \quad (4.1)$$

თავის მხრივ რეაქტიული მდგენელი აღწერს კოჭას ტევადობით და ინდუქციურ თვისებებს და ტოლია:

$$X_p = j\omega L - \frac{1}{j\omega C} \quad (4.2)$$

საერთო სრული იმპედანსი ტოლი იქნება:

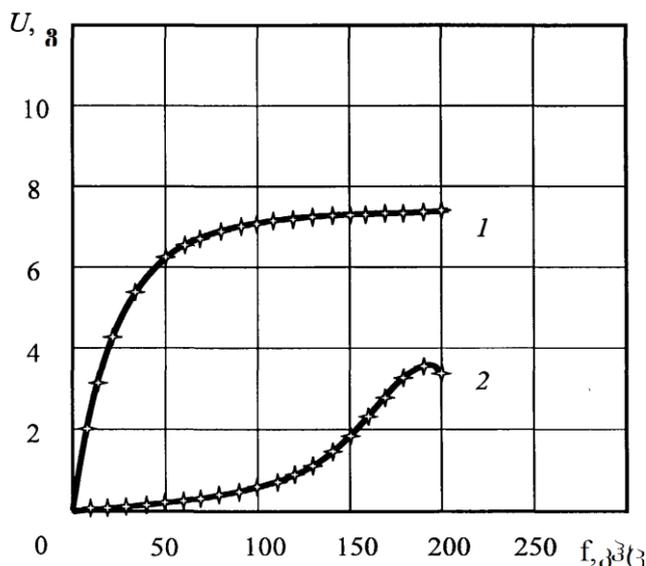
$$\hat{Z}_L(j\omega) = \sqrt{R^2 + \left(j\omega L - \frac{1}{j\omega C}\right)^2} \quad (4.3)$$

განვიხილოთ თითოეული მდგენელის გავლენა ცალ-ცალკე.

აქტიური წინაღობის გავლენა სიმცირის გამო შეიძლება უგულებელვყოთ. რეაქტიული მდგენელის გავლენა განისაზღვრება ძირითადად ინდუქციური მდგენელით, რადგან ტევადობითი მდგენელი სიხშირის უკუპროპორციულია და მაღალსიხშირულ გადამწოდებში მას,

როგორც წესი უგულებელყოფებენ. ანუ, იმპედანსი, ზემოთ აღწერილი დაშვებებით გამოისახება ასე:

$$Z_L^{\wedge}(j\omega) = j\omega L \quad (4.4)$$



ნახ.4.1. სქემის გამოსავალი სიგნალის მკვეთრი დენის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი: 1-ერთტრანსფორმატორიანი და 2-ორტრანსფორმატორიანი სქემებისათვის

საერთო სრული იმპედანსი ტოლი იქნება:

$$Z_L^{\wedge}(j\omega) = \sqrt{R^2 + \left(j\omega L - \frac{1}{j\omega C}\right)^2} \quad (4.5)$$

განვიხილოთ თითოეული მდგენელის გავლენა ცალ-ცალკე.

აქტიური წინაღობის $R=1,2\Omega$ გავლენა შეიძლება უგულებელვყოთ. რეაქტიული მდგენელის გავლენა განისაზღვრება ძირითადად ინდუქციური მდგენელით, რადგან ტევადობითი მდგენელი სიხშირის უკუპროპორციულია და მაღალსიხშირულ გადამწოდებში მას, როგორც წესი უგულებელყოფებენ. ანუ, იმპედანსი, ზემოთ აღწერილი დაშვებებით გამოისახება ასე:

$$Z_L^{\wedge}(j\omega) = j\omega L \quad (4.6)$$

(4.6) -დან გამომდინარეობს, რომ მაღალი სიხშირეებისას, კოჭას იმპედანსი იზრდება, ამასთან, მცირდება გამოსავალი სიგნალის მნიშვნელობა. ლიტერატურა [33]-ის მიხედვით ორტრანსფორმატორიანი

სქემებისთვის კუთრი ელექტროგამტარებლობის გაზომვები შეიძლება ვაწარმოოთ მაღალსიხშირული კვებისას, ძაბვის სიხშირის დიაპაზონში –100კჰც-200კჰც. ამასთან, ოპტიმალური დიაპაზონი არის 180კჰც - 200კჰც შუალედში.

ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილში შექმნილი ე.მ.ძ შეიძლება გამოთვლილ იქნას ფარადეის კანონთან მიმართებაში. იგი ტოლია:

$$U_1 = W_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.7)$$

U_1 – პირველადი გრაგნილის ბოლოზე ძაბვის მყისი მნიშვნელობა; W_1 – პირველად გრაგნილში ხვიათა რიცხვი; Φ – ჯამური მაგნიტური ნაკადი, გრაგნილის ერთი ხვიის გავლით.

მეორე გრაგნილზე შექმნილი ე.მ.ძ ტოლია:

$$U_2 = W_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.8)$$

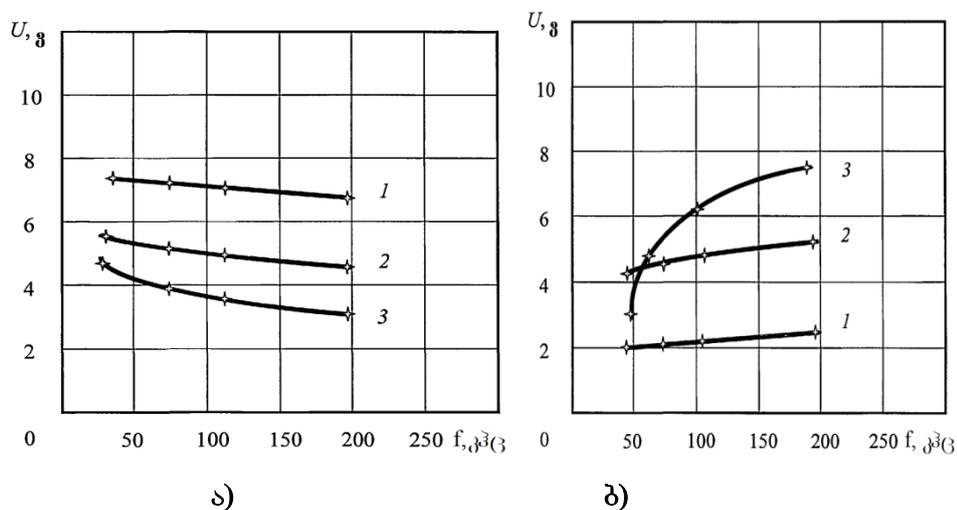
სადაც, U_2 – მეორე გრაგნილზე ძაბვაა, W_2 – მეორად გრაგნილში ხვიათა რიცხვი;

(4.7) (4.8) ფორმულებიდან გამომდინარე ჩანს, რომ გამოსავალი ძაბვა დამოკიდებულია ტრანსფორმატორზე დახვეულ ხვიათა რიცხვზე. ამიტომ, ჩატარებულ იქნა კვლევა და განისაზღვრა ხვიათა ოპტიმალური რაოდენობა ერთ და ორტრანსფორმატორიანი გადამწოდებისათვის.

ხვიების სხვადასხვა რიცხვისას, ძაბვის დამოკიდებულება სიხშირეზე, ერთტრანსფორმატორიანი გამზომი სქემისათვის[33] მიხედვით წარმოდგენილია ნახ.4.2.ა-ზე. ამ გრაფიკიდან ჩანს, რომ 67 ხვიისას გამოსავალი ძაბვა მეტია, ხოლო სტატიკური მახასიათებელი წრფივია. შესაბამისად, სასურველია დავახვიოთ მეტი ხვია, რათა გაუმჯობესდეს მაგნიტური ნაკადი.

ხვიების სხვადასხვა რიცხვისას პირველ ტრანსფორმატორზე, ძაბვის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი, ორტრანსფორმატორიანი გამზომი სქემისათვის, წარმოდგენილია ნახ.4.2.ბ-ზე. როგორც ამ ნახაზიდან ჩანს, გაზომვის ორტრანსფორმატორიანი სქემის პირველად გრაგნილზე ხვიათა რიცხვის შემცირებას

მიყვავართ ძაბვის გაზრდამდე მეორე ტრანსფორმატორის გამოსავალ გრაფილზე და ამავე დროს გადამწოდის სტატიკური მახასიათებლის გამრუდებამდე.

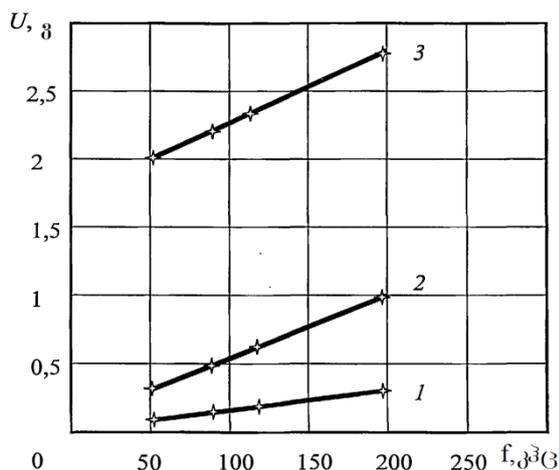


ნახ.4.2. გამოსავალი ძაბვის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი ხვიათა სხვადასხვა რიცხვისათვის: ა- ერთტრანსფორმატორიანი სქემისათვის და ბ- ორტრანსფორმატორიანი სქემის პირველ ტრანსფორმატორზე. 1-67 ხვია; 2-40 ხვია; 3-20 ხვია.

გაზომვის ორტრანსფორმატორიანი სქემის მეორე ტრანსფორმატორზე ხვიათა სხვადასხვა რიცხვისას, ძაბვის-სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი წარმოდგენილია ნახ.4.3-ზე. ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ მეორე ტრანსფორმატორზე ხვიათა რიცხვის შემცირებას მიყვავართ გამოსავალი ძაბვის და სქემის მგრძობიარობის შემცირებისკენ.

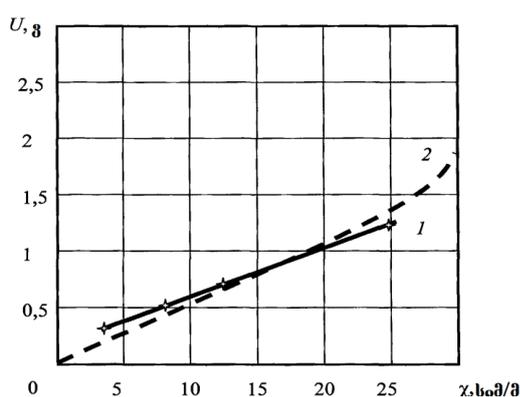
ჩატარებული კვლევებიდან შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ სქემის ოპტიმალური მუშაობისათვის აუცილებელია გავზარდოთ ხვიათა რიცხვი, რადგან ამით უზრდით მაგნიტურ ნაკადს; მაგრამ ხვიათა დახვევისას, აუცილებელია გავითვალისწინოთ, რომ ტოროიდალური გულარის შიდა დიამეტრი მცირდება, რის გამოც მცირდება სითხიანი ხვიის დიამეტრი და დაბლა ვარდება ხელსაწყოს გაზომვის დიაპაზონი მაღალი ელექტროგამტარებლობის მხარეს.

კვლევის მიღებულმა შედეგებმა საშუალება მოგვცეს მოგვეხდინა ხვიათა რიცხვისა და მაღალსიხშირული გადამწოდის მკვებავი ძაბვის ოპტიმიზაცია და მიგველო წრფივი სტატიკური მახასიათებელი.

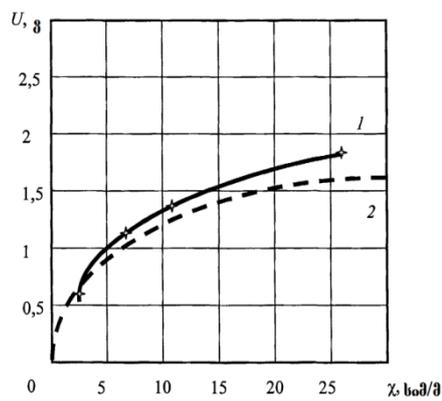


ნახ.4.3. გამოსავალი ძაბვის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი ხვიათა სხვადასხვა რიცხვისათვის: ორტრანსფორმატორიანი სქემის მეორე ტრანსფორმატორზე. 1- 67 ხვია; 2- 40 ხვია; 3- 20 ხვია.

სქემის სტატიკური მახასიათებლის განსაზღვრისათვის გამოყენებულია NaCl ხსნარი, წყალში სხვადასხვა კონცენტრაციით.



ა)



ბ)

ნახ.4.4. ა- გაზომვის ორტრანსფორმატორიანი და ბ- ერთტრანსფორმატორიანი სქემის სტატიკური მახასიათებლები: 1- ექსპერიმენტული; 2- მათემატიკური მოდელით.

სტატიკური მახასიათებლების განსაზღვრა გაზომვის ორტრანსფორმატორიანი სქემისათვის, ინფორმაციული პარამეტრით ძაბვის მიხედვით, მდგომარეობს გამოსავალი მაღალსიხშირული ძაბვის განსაზღვრაში(190კჰც), გადამწოდის მეორე ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილიდან, B7-38 ვოლტმეტრის მეშვეობით.

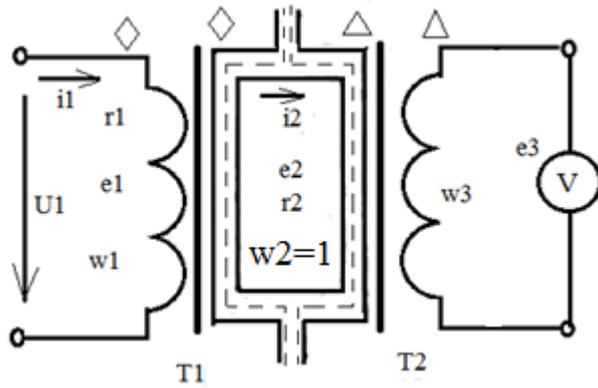
ორტრანსფორმატორიანი სქემისაგან განსხვავებით, სტატიკური მახასიათებელი ერთტრანსფორმატორიანი სქემისათვის განისაზღვრება მაღალსიხშირული ძაბვის ვარდნით (200კჰც), ცნობილ წინააღობაზე.

ექსპერიმენტული სტატიკური მახასიათებელი, ერთ და ორტრანსფორმატორიანი სქემისათვის და მათი მათემატიკური მოდელები (2.12) და (2.32) წარმოდგენილია ნახ.4.4.ა და ნახ.4.4.ბ, საიდანაც ჩანს, რომ მათემატიკური მოდელების სტატიკური მახასიათებელი და ექსპერიმენტული გზით მიღებული შედეგები ემთხვევა, რაც საშუალებას გვაძლევს შემუშავებული მოდელები გამოვიყენოთ უკონტაქტო ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების პროექტირებისას, რომლებიც მუშაობენ თხევადი ხვიის პრინციპით.

4.2. თხევადხვიანი კონდუქტომეტრის მათემატიკური მოდელის დამუშავება ოპტიმალური პარამეტრების განსაზღვრის მიზნით

კონდუქტომეტრებით ზუსტი გაზომვების ჩატარების მიზნით საჭიროა ხელსაწყოს მგრძობიარობა იყოს რაც შეიძლება მაღალი. ცნობილია, რომ ხელსაწყოს მგრძობიარობა განისაზღვრება როგორც მის გამოსავალზე გამომავალი სიგნალის ფარდობა მისი ცვლილების გამომწვევი პარამეტრის სიდიდესთან.

ბოგური სქემების გამოყენების დროს, მაქსიმალური მგრძობიარობის მისაღწევად მიზანშეწონილია ბოგას კვების წყარო იყოს უსასრულოდ მცირე შიდა წინააღობით (ძაბვის წყარო), ხოლო გამოსავალი სიგნალი გაიზომოს უსასრულოდ დიდი წინააღობის ვოლტმეტრით (იდეალური ვოლტმეტრი) [34]. ამ პირობის გათვალისწინებით თხევადხვიანი კონდუქტომეტრის ჩანაცვლების სქემას ექნება ნახ.4.5-ზე წარმოდგენილი სახე.



ნახ.4.5. თხევადხვითიანი კონდუქტომეტრის ჩანაცვლების სქემა.

წარმოდგენილ ნახაზზე T_1 და T_2 ტოროიდალურ გულარაზე დახვეული კონდუქტომეტრის შემავალი და გამოშვებული ტრანსფორმატორებია. როგორც ნახ.4.5-დან ჩანს, რომ T_1 ტრანსფორმატორის მეორეულ გრაგნილს და T_2 ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილს წარმოადგენს ერთი მთლიანი თხევადი ხვია, ანუ ამ ტრანსფორმატორებს შორის კავშირი ხორციელდება თხევად ხვიაში გამავალი დენის მიერ შექმნილი მაგნიტური ნაკადით, ხოლო განსახილველი კონდუქტომეტრის გამოსავალ სიგნალს წარმოადგენს T_2 ტრანსფორმატორის მეორეულ გრაგნილში დაინდუქცირებული E_3 ემმ-ის მოქმედი მნიშვნელობა.

რადგანაც T_2 ტრანსფორმატორის მეორეულ გრაგნილში ჩართულია უსასრულოდ დიდი წინაღობის ვოლტმეტრი, ამიტომ ამ გრაგნილში დენი არ გადის და ვოლტმეტრი გვიჩვენებს თხევად ხვიაში გამავალი დენის მიერ შექმნილი ნაკადის ცვლილებით აღძრულ ურთიერთინდუქციის ემმ-ის მოქმედ მნიშვნელობას- E_3 -ს.

E_3 ემმ-ის მოქმედი მნიშვნელობის ტრანსფორმატორების მაგნიტურ მასალაზე დამოკიდებულების შესწავლის მიზნით, წრფივი ელექტრული წრედების თეორიის საფუძველზე [35], ნახ.4.5-ზე წარმოდგენილი ჩანაცვლების სქემისათვის კწერთ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} - L_{12} \frac{di_2}{dt}; \\ 0 &= r_2 i_2 + L_{22} \frac{di_2}{dt} - L_{21} \frac{di_1}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

სადაც, r_2 –ელექტროლიტის გასაზომი ომური წინაღობაა, რომლის შებრუნებულ სიდიდეს წარმოადგენს ელექტროლიტის ელექტროგამტარობა; $r_1 - T_1$ ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ომური წინაღობაა; L_{11} –ამავე ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის თვითინდუქციის კოეფიციენტი; L_{22} – თხევადი ხვიის თვითინდუქციის კოეფიციენტი; $L_{12}=L_{21}-T_1$ ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილსა და თხევადხვიას შორის არსებული ურთიერთინდუქციურობის კოეფიციენტი; $u_1 - T_1$ ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე მოდებული ძაბვაა.

თავის მხრივ, $L_{11} = W_1^2 \lambda_1$, სადაც $W_1 - T_1$ ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ხვიათა რიცხვია; $L_{22} = W_2^2 (\lambda_1 + \lambda_2) = \lambda_1 + \lambda_2$, რადგან თხევად ხვიათა რიცხვი $W_2 = 1$;

$L_{12} = L_{21} = W_1 W_2 \lambda_1 = W_1 \lambda_1 - T_1$ ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილსა და თხევად ხვიას შორის ურთიერთინდუქციურობის კოეფიციენტი; $\lambda_1, \lambda_2 - T_1$ და T_2 ტრანსფორმატორების მაგნიტური გამტარობებია, რომლებიც თავის მხრივ ტოლია:

$$\lambda_1 = \mu_0 \mu_1 S_1 / 2\pi R_1, \quad \lambda_2 = \mu_0 \mu_2 S_2 / 2\pi R_2; \quad \text{სადაც, } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ ჰ/მ} -$$

მაგნიტური მუდმივაა, S_1, S_2 – მაგნიტური გამტარის განივკვეთის ფართობებია, R_1, R_2 - მაგნიტური გამტარის რადიუსებია.

ამოვხსნათ (4.9) სისტემა კომპლექსური ამპლიტუდების მეთოდით, ამისათვის წარმოვადგინოთ იგი ასეთი სახით:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= (r_1 + j\omega L_{11})\dot{I}_1 - j\omega L_{12}\dot{I}_2 \\ 0 &= (r_2 + j\omega L_{22})\dot{I}_2 - j\omega L_{21}\dot{I}_1 \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

სადაც, $\omega = 2\pi f$, მოდებული ძაბვის კუთხური სიხშირეა, რადიანი/წმ.

(4.10)-დან გვექნება:

$$\dot{I}_2 = \frac{j\omega L_{12}\dot{U}_1}{r_1 r_2 + \omega^2 (L_{12}^2 - L_{11} L_{22}) + j\omega (L_{11} r_2 + L_{22} r_1)} \quad (4.11)$$

თუ ჩავთვლით, რომ $\dot{U}_1 = U_1$, (4.11) –დან შესაბამისი გარდაქმნებით მივიღებთ:

$$\dot{I}_2 = \frac{j\omega L_{12} U_1}{\sqrt{[r_1 r_2 + \omega^2 (L_{12}^2 - L_{11} L_{22})]^2 + [\omega (L_{11} r_2 + L_{22} r_1)]^2}} \quad (4.12)$$

თხევად ხვიაში ინდუქცირებული დენის მყისი მნიშვნელობა (4.12) თანახმად, გამოისახება შემდეგნაირად:

$$i_2 = \frac{\sqrt{2}\omega L_{12}U_1 \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{[r_1 r_2 + \omega^2(L_{12}^2 - L_{11}L_{22})]^2 + [\omega(L_{11}r_2 + L_{22}r_1)]^2}} \quad (4.13)$$

განვსაზღვროთ გამოშვადლი სიგნალის (e_3) მყისი მნიშვნელობა. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონისა და [36]-ს თანახმად:

$$e_3 = -(-L_{32}) \frac{di_2}{dt} = L_{32} \frac{di_2}{dt} \quad (4.14)$$

სადაც, $L_{32} = W_2 W_{32}$

(4.14)-დან (4.13)-ის გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$e_3 = \frac{\sqrt{2}\omega^2 L_{12} L_{23} U_1 \cos(\omega t - \varphi)}{\sqrt{[r_1 r_2 + \omega^2(L_{12}^2 - L_{11}L_{22})]^2 + [\omega(L_{11}r_2 + L_{22}r_1)]^2}} \quad (4.15)$$

L_{11} , L_{22} , L_{12} და L_{23} გამოსახულებების გათვალისწინებითა და შესაბამისი გარდაქმნების შედეგად ინდუქცირებული ე.მ.ძ-ის მოქმედ მნიშვნელობას ექნება შემდეგი სახე:

$$E_3 = \frac{W_1 W_3 \lambda_1 \lambda_2 \omega^2 U_1}{\sqrt{[r_1 r_2 + \omega^2(W_1^4 \lambda_1^2 - W_1^2 \lambda_1 (\lambda_1 + \lambda_2))]^2 + [\omega(W_1^2 r_2 + (\lambda_1 + \lambda_2) r_1)]^2}}$$

(4.16)

გამოსავალი სიგნალის მიღებული ანალიზური გამოსახულება (4.16) გვიჩვენებს, რომ საზომი გარდამქმნელის მგრძობიარობა წარმოადგენს რვა დამოუკიდებელი პარამეტრის ფუნქციას: მოდებული ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობის U , კვების წყაროს f სიხშირის, შემავალი და გამოშვადლი ტრანსფორმატორების ხვიათა რიცხვების W_1 და W_3 ; შემავალი და გამოშვადლი ტრანსფორმატორების მაგნიტური გამტარობების λ_1 და λ_2 ; შემავალი ტრანსფორმატორის ომური წინაღობის R_1 , საკვლევი სითხის წინაღობის R_2 .

(4.16) გამოსახულებიდან ცხადად ჩანს, რომ გამოსავალი ტრანსფორმატორის ხვიათა რიცხვის W_3 გაზრდითა და კვების წყაროს ძაბვის გაზრდით გამოსავალი სიგნალის სიდიდე იზრდება (რადგან ეს სიდიდეები იმყოფებიან მხოლოდ (4.16) გამოსახულების მრიცხველში), ხოლო შემავალი ტრანსფორმატორის ომური წინაღობის გაზრდით – მცირდება (ეს სიდიდე მხოლოდ გამოსახულების მნიშვნელშია). ომური

წინააღმდეგობის შემცირება მიგვიჩვენებს, რომ შემავალი ტრანსფორმატორის ხვიათა რიცხვი უნდა იყოს რაც შეიძლება მცირე რაოდენობის ან დიდი კვეთის (რაც თხევადხვიათი კონდუქტომეტრის გადამწოდის კონსტრუქციიდან და ზომებიდან გამომდინარე შეუძლებელია).

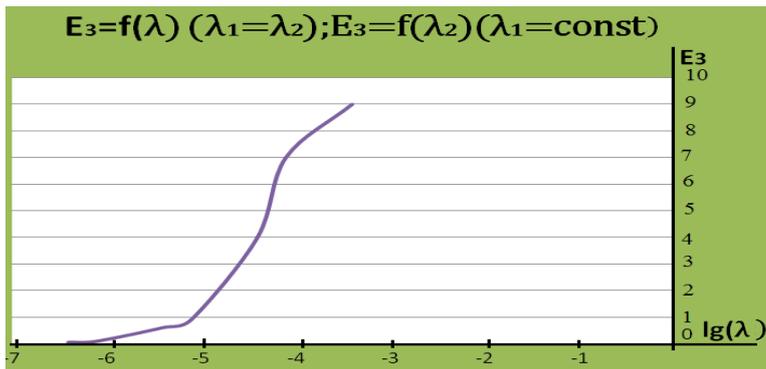
როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ თხევად ხვიათი კონდუქტომეტრში შემავალი ტრანსფორმატორის მეორეული გრაგნილისა და გამომავალი ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის როლს ასრულებს თხევადი ხვია ხვიათა რიცხვით 1. თუ მაგალითად, შემავალი ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილი შეიცავს 10 ხვიას და კონდუქტომეტრი ჩართულია 10ვ ძაბვაზე, მაშინ ერთ ხვიას შეესაბამება 1ვ ძაბვა და ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტიდან გამომდინარე თხევად ხვიაზე მოდის 1ვ ძაბვა. იმისათვის, რომ თხევად ხვიას მაქსიმალურად გადაეცეს შემავალი ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე მოდებული ძაბვა, საჭიროა შემავალი ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილი შესრულდეს ერთი ხვით, რაც არც თუ ისე ადვილია, რადგან ერთი ხვიის აქტიური წინააღმდეგობა თითქმის ნულის ტოლია და ეს გამოიწვევს კვების წყაროს დამოკლებას. ამის თავიდან ასაცილებლად საჭიროა მოვახდინოთ ტრანსფორმატორის გულარების შერჩევა, რომლებიც შემავალი ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ერთი ხვიის შემთხვევაში გარკვეულ სიხშირეზე მოახდენენ ინდუქციური წინააღმდეგობის იმდენად გაზრდას, რომ არ მოხდება კვების წყაროს დამოკლება.

4.3. თხევადხვიათი კონდუქტომეტრის მგრძობიარობის მაგნიტურ მასალაზე დამოკიდებულების გამოკვლევა.

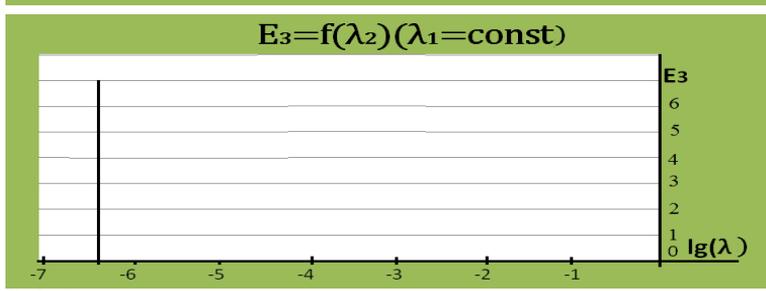
როგორც წინა პარაგრაფში აღვნიშნეთ გამოსავალი სიგნალის მოქმედი მნიშვნელობის გაზრდისათვის საჭიროა მოხდეს ტრანსფორმატორის გულარების მასალების შერჩევა.

ტრანსფორმატორების მაგნიტური მასალის E_3 ემპ-ის მოქმედი მნიშვნელობაზე გავლენის გამოკვლევის მიზნით T_1 და T_2 ტრანსფორმატორებისათვის ავიღეთ ტოროიდალური მაგნიტოგამტარის

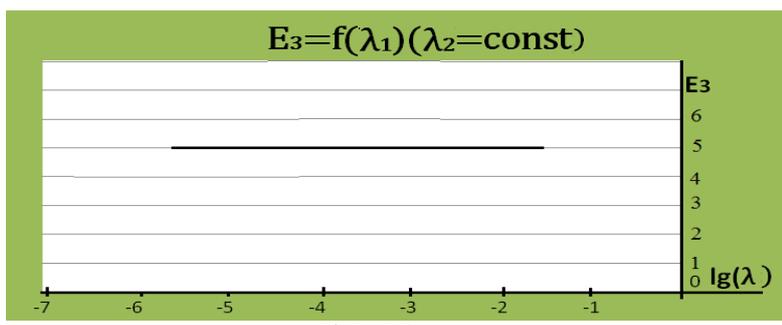
შემდეგი ზომები: გარე რადიუსები $R_1 = R_2 = 18$ მმ, შიდა რადიუსები $r_1 = r_2 = 8$ მმ, სისქით 5 მმ, შესაბამისად მათი საშუალო რადიუსი იქნება $R_{საშ} = 13$ მმ. ვიგულისხმეთ, რომ მაგნიტოგამტარებად შეიძლება როგორც ფერიტების, ასევე ამორფული მასალებისაგან დამზადებული გულარების გამოყენება და ამიტომ მაგნიტური შეღწევადობა μ ვცვალოთ 500–500000 შუალედში. გაანგარიშებისათვის ასევე მივიღეთ, რომ: $U_1 = 1$ ვ. $W_1 = 10, W_3 = 100$; $f = 10^4$ კც, $r_1 \rightarrow 0, r_2 = 5$. ამ მონაცემების მიხედვით მაგნიტოგამტარების ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის გავიანგარიშეთ გამოსავალ T_2 ტრანსფორმატორის მეორეულ გრაგნილზე დაინდუცირებული E_3 ემძ-ის სიდიდეები და ავაგეთ ამ ემძ-ის მაგნიტურ შეღწევადობაზე დამოკიდებულების გრაფიკები, რომლებიც წარმოდგენილია ნახ.4.6-ზე, ნახ.4.7-ზე და ნახ.4.8-ზე -ზე.



ნახ.4.6



ნახ.4.7



ნახ.4.8.

როგორც ნახ.4.6-დან ჩანს, როცა $\lambda_1 = \lambda_2$, მაშინ მაგნიტური გამტარობების ერთდროულ ზრდასთან ერთად გამოსავალი T_2 ტრანსფორმატორის მეორეულ გრაგნილზე შესაბამისად იზრდება დაინდუქცირებული E_3 ემმ-ის მოქმედი მნიშვნელობებიც. E_3 ემმ-ის ცვლილებას იგივე ხასიათი აქვს იმ დროსაც, როცა $\lambda_1 = const$ და იცვლება მხოლოდ λ_2 .

ნახ.4.7-ის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ როცა შემაგალი T_1 ტრანსფორმატორის მაგნიტური გამტარის გამტარობა მუდმივია ($\lambda = const$), მაშინ გამომავალი T_2 ტრანსფორმატორის მაგნიტური გამტარის გამტარობის ზრდის პროპორციულად იზრდება გამომავალი E_3 ემმ-ის მოქმედი მნიშვნელობაც.

ნახ.4.8-ის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ როცა გამომავალი T_2 ტრანსფორმატორის მაგნიტური გამტარის გამტარობა მუდმივია ($\lambda = const$), მაშინ შემაგალი T_1 ტრანსფორმატორის მაგნიტური გამტარის გამტარობის λ_1 ცვლილებისას E_3 ემმ-ის მოქმედი მნიშვნელობა მუდმივი სიდიდეა.

კონდუქტომეტრების მგრძნობიარობის მაგნიტურ მასალაზე დამოკიდებულების გამოკვლევამ გვიჩვენა, რომ კონდუქტომეტრების მგრძნობიარობის გაზრდისათვის საკმარისია მაღალი მაგნიტური შეღწევადობის ძვირად ღირებული ამორფული მასალებისაგან დამზადებული იქნეს მხოლოდ გამომავალი T_2 ტრანსფორმატორის გულარა, ხოლო შემაგალი T_1 ტრანსფორმატორის გულარად შეიძლება გამოყენებული იქნეს იაფფასიანი ფერიტები [31].

4.4. თხევადხვითანი კონდუქტომეტრის შემავალი ტრანსფორმატორის გულარას ოპტიმალური ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობისა და მასალის განსაზღვრა

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, თხევადი გარემო, რომელიც წარმოადგენს შემავალი ტრანსფორმატორის მეორეულ გრაგნილს [37], წარმოდგინდება ერთი ხვიის სახით ($W_2 = 1$) და ამასთანავე საჭიროა კონდუქტომეტრის შემავალი ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე მოდებული ძაბვა ტრანსფორმირების შემდეგ რაც შეიძლება მაქსიმალური სიდიდით მოედოს თხევად ხვიაზე. ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის განსაზღვრებიდან გამომდინარე ეს მოხდება იმ შემთხვევაში, თუ შემავალი ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ხვიათა რიცხვიც $W_1=1$. წინა პარაგრაფში მოყვანილმა გამოკვლევებმა გვიჩვენა, რომ მგრძობიარობის გაზრდისათვის შემავალი T_1 ტრანსფორმატორის გულარად შეიძლება გამოყენებული იქნეს იაფფასიანი ფერიტები, მაგრამ ფერიტების ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობა არ აღემატება 50 000, რაც საკმარისი არ არის. აქედან გამომდინარე, უნდა განისაზღვროს კონდუქტომეტრის შემავალი ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის გულარას ისეთი ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობა ერთი ხვიის შემთხვევაში, რომელიც 10ჯ შემავალი ძაბვის პირობებში ერთ ხვიაში უზრუნველყოფს არაუმეტეს 3ა დენის გავლას. იმის გამო, რომ კონდუქტომეტრები მუშაობენ დაბალი ძაბვის (არაუმეტეს 10ვ) პირობებში, ამიტომ თხევად ხვიაზე ამ სიდიდის ძაბვის მოსაღებად საჭიროა ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი იყოს 1-ის ტოლი ($\kappa=1$). ეს შესაძლებელია იმ შემთხვევაში, თუ შემავალი ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ხვიათა რიცხვი ტოლი იქნება 1; ერთ ხვიას გააჩნია თითქმის ნულის ტოლი აქტიური წინაღობა $R \approx 0$ და მისი მიერთება კვების წყაროსთან გამოიწვევს კვების წყაროს დამოკლებასა და მწყობრიდან გამოსვლას. ამის თავიდან აცილებისათვის საჭიროა შეირჩეს ისეთი მაგნიტური შეღწევადობის გულარა, რომელიც ერთი

ხეიის შემთხვევაში ოპტიმალურ 10000 ჰც სიხშირეზე უზრუნველყოფს რეაქტიულ წინაღობის ისეთ სიდიდეს, რომ შემავალი ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილში გაიაროს არაუმეტეს 3ა სიდიდის დენმა. კოჭას რეაქტიული წინაღობის სიდიდის გამოკვლევა ჩავატარეთ შემდეგი ზომების მაგნიტოგამტარზე: $S = 50 \cdot 10^{-6} \text{მ}^2$; $R = 18 \cdot 10^{-3} \text{მ}$; ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობის μ -ს ცვლილება ვაწარმოეთ $500 \div 500000$ შუალედში.

ლიტერატურიდან [27] ცნობილია, რომ ინდუქციური კოჭას რეაქტიული წინაღობა გამოითვლება ფორმულით:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L, \quad (4.17)$$

სადაც, f -სიხშირეა(ჰც); L - კოჭას თვითინდუქციის კოეფიციენტი(ჰნ); რომელიც თავის მხრივ გამოითვლება ფორმულით:

$$L = W_1^2 \lambda, \quad (4.18)$$

სადაც, W_1 –შემავალი ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ხეიათა რიცხვია და ჩვენს შემთხვევაში $W_1 = 1$, ხოლო λ -მაგნიტური გამტარობაა (ჰნ/მ); რომელიც თავის მხრივ ტოლია:

$$\lambda = \mu \mu_0 \frac{S}{l} \quad (4.19)$$

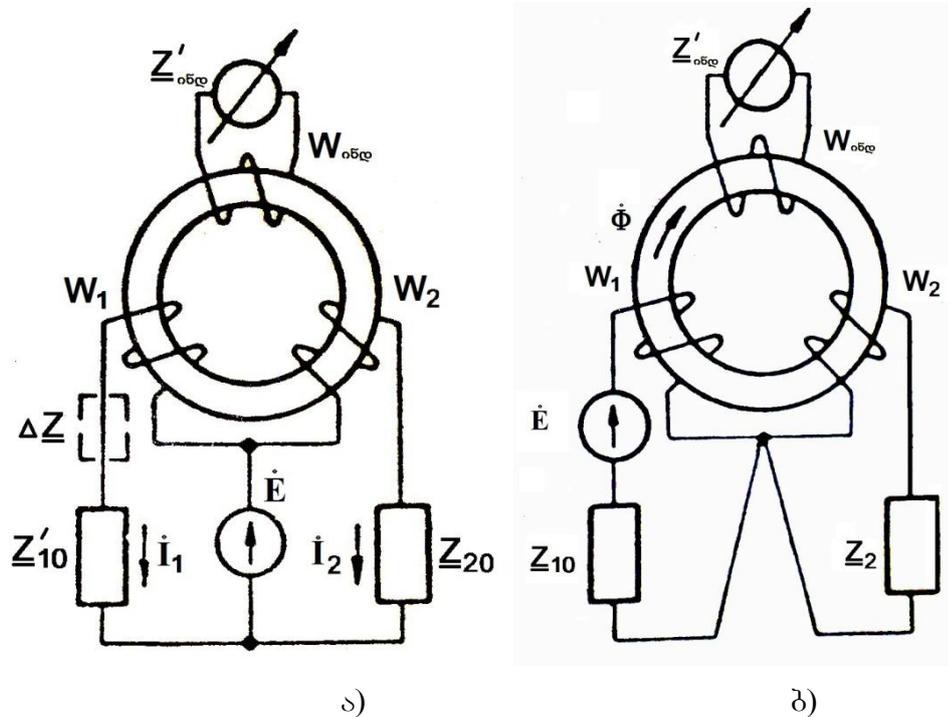
სადაც, $l = 2\pi R$, მაგნიტოგამტარის საშუალო სიგრძეა(მ); ხოლო $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ -მაგნიტური მუდმივაა (ჰნ/მ); ამ მონაცემების მიხედვით ჩატარებული გამოკვლევებით მივიღეთ, რომ შემავალი T_1 ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის რეაქტიული წინაღობის სიდიდე გულარას ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობის $500 \div 50000$ ფარგლებში ცვლილებისას იცვლება $0,02 \div 19$ ომი ფარგლებში. ამოცანის პირობიდან გამომდინარე შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ შემავალი ტრანსფორმატორის ერთხვიიან პირველად გრაგნილში არაუმეტეს 3ა დენის გავლას 10ვ ძაბვის დროს, 10000 ჰც სიხშირეზე, გულარას მოცემული გეომეტრული ზომების დროს, უზრუნველყოფს 100000 ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობის მქონე გულარა. ასეთი სიდიდის მაგნიტური შეღწევადობა გააჩნია თანამედროვე ამორფული მასალებისაგან დამზადებულ გულარებს. მოცემული გეომეტრული ზომებით ამ მასალებისაგან დამზადებული გულარების შემთხვევაში

პირველადი გრაგნილის რეაქტიული წინაღობა 4 ომის ტოლია, ხოლო გრაგნილში გამავალი დენის სიდიდე 2,5 ამპერი, რაც სავსებით მისაღებია მაღალი მგრძნობიარობისათვის. ჩატარებული გამოკვლევების საფუძველზე დადგენილ იქნა, რომ კონდუქტომეტრული გარდამქმნელის შემავალი ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილი შესაძლებელია შესრულდეს ერთი ხვით სხვადასხვა გეომეტრული ზომის ამორფული მასალისაგან დამზადებულ გულარაზე, რომელიც საჭირო სიხშირეზე კონდუქტომეტრისათვის დასაშვები ძაბვის პირობებში უზრუნველყოფს დასაშვები დენის გატარებას [37].

4.5. ძაბვის მიხედვით ტრანსფორმატორული საზომი ბოგების მაქსიმალური მგრძნობიარობის განსაზღვრის მიზნით კომპიუტერული პროგრამის ბლოკ-სქემის დამუშავება.

ელექტრომეტრიაში გაწონასწორების ელექტროსაზომი წრედების მგრძნობიარობის ანალიზის პრობლემა მიეკუთვნება აქტუალურ პრობლემათა რიცხვს და მრავალჯერ მიუქცევია მეკვლევართა ყურადღება. უკანასკნელ პერიოდში, ამ პრობლემის მიმართ განსაკუთრებით გაიზარდა ინტერესი, როდესაც გამოჩნდა გაწონასწორების ელექტროსაზომი წრედების მთელი რიგი სახესხვაობები [38], მაგრამ მთელმა რიგმა წრედებმა განსაკუთრებით მწვავედ დააყენა მათგან ოპტიმალური წრედის არჩევის საკითხი, სახელდობრ, მგრძნობიარობის მიხედვით. როგორც ცნობილია, ასეთი ამოცანა ძნელად სრულდება მგრძნობიარობის გაანგარიშების კლასიკური მეთოდის გამოყენებით. დღეისათვის დამუშავებულია ზოგიერთი საერთო მეთოდი, რომელიც დაფუძნებულია ოთხპოლუსებისა და მრავალპოლუსების თეორიაზე, მაგრამ სამწუხაროდ მათი გამოყენება შეზღუდულია წრედებით, რომელთა მზომი

მდგომარეობა ფასდება თითო გამოსავალი პარამეტრით და შესაბამისად, განსაკუთრებით წრედების ფართო კლასი – კვაზიგაწონასწორებული წრედები – მთლიანად დარჩა ყურადღების მიღმა. ამიტომაც, გასაკვირი არ უნდა იყოს, რომ წონასწორული ელექტრომზომი წრედების მგრძობიარობის განსაზღვრის ახალი მეთოდების ძიებანი გრძელდება. ჩვენი მიზანია ფერომაგნიტური გულარის თვისებების გათვალისწინებით, მისი კომპლექსური მაგნიტური წინააღობის საფუძველზე, ტრანსფორმატორული საზომი ბოგების ძაბვის მიხედვით მგრძობიარობის გამოსახულების გამოყვანა და ბოგების ოპტიმალური პარამეტრების განსაზღვრისათვის კომპიუტერული პროგრამის დამუშავება. განვიხილოთ ტრანსფორმატორული ბოგა, რომლის სქემა ნაჩვენებია ნახ.4.9.ა-ზე;



ნახ.4.9.

კვების წყარო \dot{E} -კვებავს ორ შტოს, რომელშიც გადიან I_1 და I_2 დენები. Z_1 , Z_2 შესაღარებელი წინააღობებია. გულარზე განლაგებულია ორი გრაგნილი W_1 და W_2 ხვიებით და ინდიკატორული გრაგნილი W_3 ხვიათა რიცხვით, რომელთანაც ნულოვანი წინააღობაა ჩართული Z_3 [38]. აღვნიშნოთ კოჭას სრული წინააღობები შემდეგნაირად: $Z_{კ1} = r_{კ1} + jx_{კ1}$,

$\underline{Z}_2=r_{k2}+jx_{k2}$, $\underline{Z}_3=r_{k3}+jx_{k3}$. ისინი განპირობებულნი არიან ფანტკის ნაკადებისა და სპილენძის წინაღობის არსებობით. კვების წყაროს შიდა წინაღობა ჩავთვალოთ ნულის ტოლად, ასევე დავუშვათ, რომ w_1, w_2, w_3 , ხვეების მქონე წრედებს შორის კავშირი რეალიზდება გულარში მხოლოდ Φ მაგნიტური ნაკადით. თავდაპირველად განვიხილოთ წონასწორობაში მყოფი ბოგა, როცა გულარში Φ მაგნიტური ნაკადი და შესაბამისად, დენი I_3 ნულინდიკატორში ნულის ტოლია. I_1 დენისა და \underline{Z}_1 წინაღობის მნიშვნელობები, რომელთა დროსაც ადგილი აქვს წონასწორობას, აღვნიშნოთ შესაბამისად:

I_{10} და \underline{Z}_{10} – წონასწორობისას გვექნება:

$$I_{10}W_1=I_2W_2 \quad (4.20)$$

სადაც, $I_{10}=\dot{E}/\underline{Z}_{10}$, $I_2=\dot{E}/\underline{Z}_2$ (4.21)

ამასთანავე $\underline{Z}_{10}=\underline{Z}_{10}'+\underline{Z}_{31}$ $|\underline{Z}_{31}| \ll |\underline{Z}_1|$ $\underline{Z}_2=\underline{Z}_2'+\underline{Z}_{32}$ $|\underline{Z}_{32}| \ll |\underline{Z}_2|$ (4.22)

დავუშვათ, რომ \underline{Z}_{10} წინაღობა შეიცვალა მცირე $\underline{\Delta Z}$ – სიდიდით და გაუტოლდა $\underline{Z}_1'=\underline{Z}_{10}'+\underline{\Delta Z}$. $\underline{\Delta Z}$ წინაღობის შემოყვანა ექვივალენტურია \dot{E}_{333} – ე.მ.ძ-ის, რომელიც $|\underline{\Delta Z}| \ll |\underline{Z}_{10}|$ პირობის დროს ტოლია $\dot{E}_{333}=-I_{10}\underline{\Delta Z}$. მაგნიტური ნაკადი გულარში, რომელიც აღიძვრება წრედის წონასწორობის დარღვევისას, მოიძებნება როგორც ნაკადი, გამოწვეული \dot{E}_{333} ე.მ.ძ-ით [39].

როცა წრედში მოქმედებს მხოლოდ ერთი \dot{E}_{333} ე.მ.ძ., მაშინ სქემას აქვს ნახ.4.9.ბ-ზე მოცემული სახე; Φ ნაკადის განსაზღვრისათვის ვისარგებლოთ ფორმულით:

$$\dot{\Phi}=\sum_{i=0}^n I_{ix}W_i / \underline{Z}_{მაგ.333} \quad (4.23)$$

სადაც, $\underline{Z}_{მაგ.333}=\underline{Z}_{მაგ} + \sum_{i=0}^n \sum_{l=0}^n j \frac{w_i}{Z_{il}} w_l$

I_{ix} – არის დენი, რომელიც გაივლიდა წრედის i -ურ გრაგნილში ე.მ.ძ. ზემოქმედებით, თუ $\underline{Z}_{მაგ}$ გულარის მაგნიტური წინაღობა იქნებოდა უსასრულოდ დიდი, წინააღმდეგ შემთხვევაში, გულარში მოთავსებულ w_i გრაგნილებში არ აღიძვროდა ე.მ.ძ. \underline{Z}_{i1} – ურთიერთინდუქციურობის წინაღობაა.

i_{1x}, i_{2x}, i_{3x} დენებს ვპოულობთ გამომდინარე იმ დაშვებიდან, რომ წრედში მოქმედებს ე.მ.ძ. $\dot{E}_{\text{გვ}}$ და გულარში ნაკადი ნულის ტოლია ($\underline{Z}_{\text{გა}} = \infty$). ადვილია დავინახოთ, რომ როცა $i_{2x} = i_{3x} = 0$, მაშინ

$$i_{1x} = \frac{\dot{E}_{\text{გვ}}}{\underline{Z}_{10}} = -\frac{i_{10}\Delta Z}{\underline{Z}_{10}} = -i_{10}\varepsilon, \text{ სადაც, } \varepsilon = \frac{\Delta Z}{\underline{Z}_{10}}$$

მაშინ, (4.23) თანახმად $\dot{\phi} = \frac{i_{1x}W_1}{\underline{Z}_{\text{გა}} \text{ გვ}} = -\frac{i_{10}W_1}{\underline{Z}_{\text{გა}} \text{ გვ}} \varepsilon$,

სადაც, $\underline{Z}_{\text{გა}} \text{ გვ}} = \underline{Z}_{\text{გ}} + j_w \frac{W_1^2}{\underline{Z}_{10}} + j_w \frac{W_2^2}{\underline{Z}_2} + j_w \frac{W_3^2}{\underline{Z}_3}$

ვიცით რა $\dot{\phi}$, მაშინ ვიპოვით \dot{E}_3 -ე.მ.ძ. რომელიც აღიძვრება ინდიკატორულ გრაგნილში და i_3 - ინდიკატორში დენი.

$$\dot{E}_3 = -j_w W_3 \dot{\phi} \frac{j_w W_3 W_1 i_{10}}{\underline{Z}_{\text{გა}} \text{ გვ}} \varepsilon; \quad i_3 = \frac{\dot{E}_3}{\underline{Z}_3} = \frac{j_w W_3^2 W_1 i_{10}}{\underline{Z}_3 W_3 \underline{Z}_{\text{გა}} \text{ გვ}} \varepsilon; \quad i_3 = \frac{\underline{Z}_{\text{გა}} \text{ გვ}}{\underline{Z}_{\text{გ}} \text{ გვ}} i_{10}' \varepsilon;$$

$\underline{Z}_{\text{გა}} \text{ გვ}} = \frac{W W_3^2}{\underline{Z}_3}$ მაგნიტური წინააღობაა, რომელიც ინდიკატორის წრედის მიერაა შემოყვანილი. i_{10} არის დენი W_1 გრაგნილში დაყვანილი W_3 ხვიათა რიცხვზე. აქედან, ბოგირის მგრძობიარობა დენის მიხედვით ტოლია:

$$S_I = \frac{i_3}{\varepsilon} = \frac{\underline{Z}_{\text{გა}} \text{ გვ}}{\underline{Z}_{\text{გ}} \text{ გვ}} i_{10}' = \frac{\underline{Z}_{\text{გა}} \text{ გვ}}{\underline{Z}_{\text{გ}} + \underline{Z}_{\text{გა}1} + \underline{Z}_{\text{გა}2} + \underline{Z}_{\text{გა}3}} i_{10}'$$

თუ ინდიკატორის წრედი გათიშულია ანუ $\underline{Z}_3 = \infty$, მაშინ ინდიკატორული გრაგნილის მომჭერებზე ძაბვა ტოლია:

$$U_{3x} = \dot{E}_3 = -\frac{i_{10} W_1 j_w W_3}{\underline{Z}_{\text{გ}} + j_w \frac{W_1^2}{\underline{Z}_{10}} + j_w \frac{W_2^2}{\underline{Z}_2}} \varepsilon$$

მგრძობიარობა ძაბვის მიმართ ტოლი იქნება:

$$S_u = \frac{U_{3x}}{\varepsilon} = -\frac{i_{10} W_1 j_w W_3}{\underline{Z}_{\text{გ}} + j_w \frac{W_1^2}{\underline{Z}_{10}} + j_w \frac{W_2^2}{\underline{Z}_2}} = \frac{\dot{E} / \underline{Z}_{10} W_1 W_3 j_w}{\underline{Z}_{\text{გ}} + j_w \frac{W_1^2}{\underline{Z}_{10}} + j_w \frac{W_2^2}{\underline{Z}_2}};$$

თუ გავითვალისწინებთ შემდეგ დაშვებებს:

$$\underline{Z}_{\text{გ}} = \frac{\underline{Z}_{10} \underline{Z}_2}{\underline{Z}_{10} + \underline{Z}_2}; \quad \begin{cases} \underline{Z}_{10} = R_1 + j_w(L_1 - M) \\ \underline{Z}_2 = R_2 + j_w(L_2 - M) \end{cases}; \quad \begin{cases} \dot{E} = J_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ \dot{E} = J_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \end{cases}$$

ჩავთვალოთ, რომ: $W_1 = W_2 = W; R_1 = R_2 = R; L_1 = W_1^2 \lambda; L_2 = W_2^2 \lambda; M = W_1 W_2 \lambda = W^2 \lambda; \lambda = \mu \mu_0 \frac{s}{l} = \mu \mu_0 C$.

სადაც:

l – ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარის სიგრძეა,

λ – მაგნიტოგამტარობაა,

R –ომური წინააღობაა,

μ – მაგნიტური შეღწევადობაა,

μ_0 – $4\pi \cdot 10^{-7}$ ჰენ/მ – მაგნიტური მუდმივაა,

s – მაგნიტური გულარის განიკვეთის ფართობია;

შესაბამისი გამოთვლებისა და გარდაქმნების შედეგად მგრძნობიარობას ძაბვის მიხედვით, ექნება შემდეგი სახე:

$$S_u = \frac{2\dot{E}_{\text{კვ}} W W_3 J_w (R^2 + \omega^2 W^4 \lambda^2)}{-3\lambda^2 R^2 W^4 \omega^2 + J[4\omega R^3 W^2 \lambda + 4\omega R^2 W^2 + 2RW^4 \lambda^2]} \quad (4.24)$$

გამოსახულების მრიცხველი აღვნიშნოთ:

$$|\dot{A}| = 2\dot{E}_{\text{კვ}} W W_3 \omega (R^2 + \omega^2 W^4 \lambda^2) \quad (4.25)$$

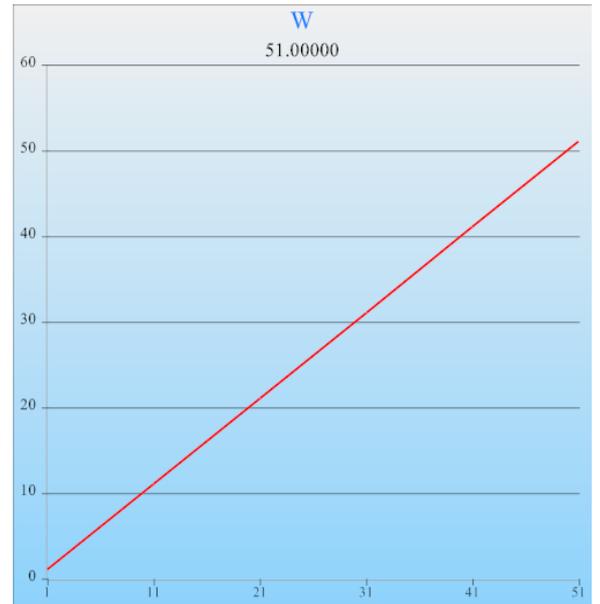
ხოლო მნიშვნელი აღვნიშნოთ:

$$|\dot{B}| = \sqrt{(3\lambda^2 R^2 W^4 \omega^2)^2 + (4\omega R^3 W^2 \lambda + 4\omega R^2 W^2 + 2RW^4 \lambda^2)^2} \quad (4.26)$$

ვინაიდან ხელსაწყო ზომავს ელექტრული სიდიდის მოქმედ

$$\text{მნიშვნელობას, ამიტომ, მივიღოთ, რომ } S_u = \frac{|\dot{A}|}{|\dot{B}|} \quad (4.27)$$

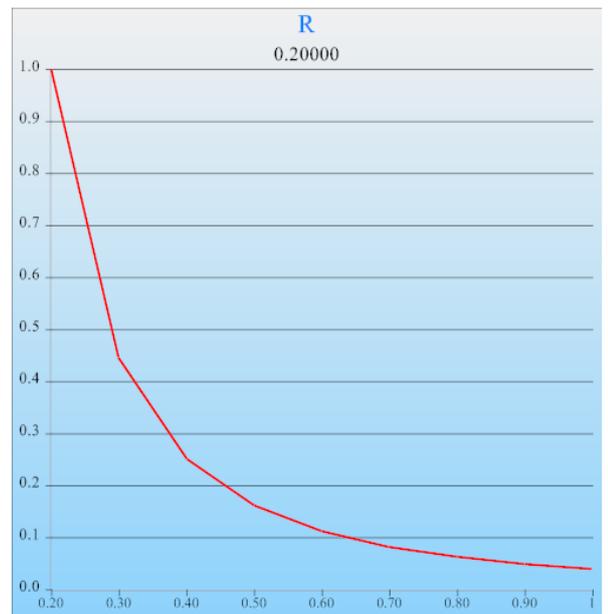
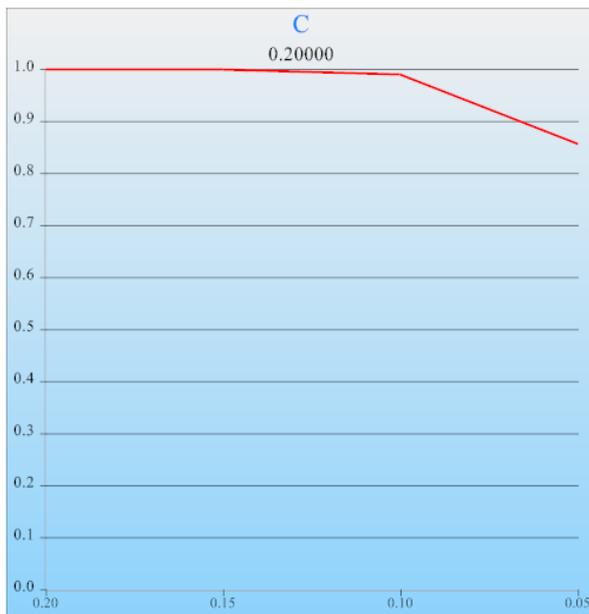
(4.25), (4.26) და (4.27) გამოსახულებების საფუძველზე მაქსიმალური მგრძნობიარობის საპოვნელად შედგენილი იქნა ნახ.4.10-ზე წარმოდგენილი ბლოკ-სქემა, რომლის მიხედვითაც შედგენილი იქნა პროგრამა. პროგრამის მიხედვით გამოკვლეული იქნა მგრძნობიარობის დამოკიდებულება საზომი ბოგირების ელექტრულ და გეომეტრიულ პარამეტრებზე [40]. ნახ.4.11.ა-ზე წარმოდგენილია მგრძნობიარობის დამოკიდებულება მაგნიტოგამტარის მაგნიტურ შეღწევადობაზე ($M\mu$). ნახ.4.11.ბ-ზე-მხრების გრაფილების ხვიათა რიცხვზე (W), ნახ.4.12.ა-ზე მაგნიტოგამტარის საშუალო სიგრძისა და განიკვეთის ფართობის ფარდობაზე (C), ნახ.4.12.ბ-ზე გრაფილების წინააღობაზე (R) და ნახ.4.13-ზე - სიხშირეზე (F) [41].



ა)

ბ)

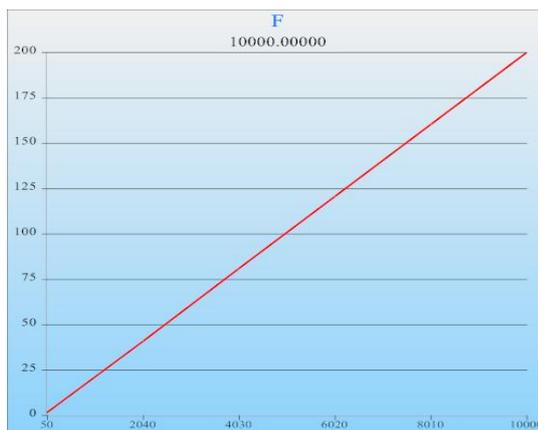
ნახ.4.11. მგრძნობიარობის დამოკიდებულება: ა- მაგნიტოგამტარის მაგნიტურ შეღწევადობაზე; ბ- ბოგას მხრების გრაგნილების ხვიათა რიცხვზე.



ა)

ბ)

ნახ.4.12. მგრძნობიარობის დამოკიდებულება: ა- მაგნიტოგამტარის საშუალო სიგრძისა და განიკვეთის ფართობის ფარდობაზე; ბ-გრაგნილების ომურ წინაღობაზე.



ნახ.4.13. მგრძნობიარობის დამოკიდებულება სიხშირეზე.

როგორც ამ ნახაზებიდან ჩანს, მაგნიტოგამტარის მაგნიტური შეღწევადობის, მხრების გრაგნილების ხვიათა რიცხვისა და სიხშირის გაზრდით მგრძნობიარობა იზრდება; გრაგნილების წინააღობის გაზრდით – მცირდება, ხოლო მაგნიტოგამტარის საშუალო სიგრძისა და განიკვეთის ფართობის ფარდობის $0,05-0,1$ საზღვრებში იზრდება, ხოლო შემდეგი გაზრდით თითქმის მუდმივია.

დასკვნები

1. განხილულია ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების შედარებით გავრცელებული სქემები, გაანალიზებულია მათი ღირსებები, ნაკლოვანებები და მათი გამოყენების შესაძლო სფეროები.
2. ჩატარებულია კონდუქტომეტრული ანალიზის არსებული მეთოდების მიმოხილვა, განხილულია კონტაქტური, არაკონტაქტური, ინდუქციური და ტევადობითი პირველადი საზომი გარდამქმნელები, ასევე მათი გამოყენების დარგები
3. შემუშავებულია მათემატიკური მოდელები ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ბაზისური სქემებისთვის.
4. მიღებულია სტატიკური მახასიათებლების მათემატიკური მოდელები ერთტრანსფორმატორიანი, ორტრანსფორმატორიანი და მრავალხვიანი ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრებისა, რომელთა მუშაობა დაფუძნებულია უშუალო შეფასებისა და კომპენსაციური მეთოდების გამოყენებაზე.
5. მიღებული მათემატიკური მოდელების საფუძველზე, მოყვანილია გრაფიკები ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ყველა წარმოდგენილი სქემისათვის.
6. განხილულია შედარებით მეტად გავრცელებული კონდუქტომეტრული პირველადი საზომი გარდამსახები, გამომუშავებულია მათი ღირსებანი, ნაკლოვანებებიც, და ნაჩვენებია, რომ ინდუქციური პირველადი საზომი გარდამქმნელები თავისი სიმარტივის, საიმედოობის, მგრძობიარობებისა და უწყვეტ ტექნოლოგიურ პროცესში მათი გამოყენების შესაძლებლობებით პოპულარულნი არიან წარმოების სხვადასხვა დარგებში, სადაც მოითხოვება კარგად გამტარი ნივთიერებების, მარილებისა და ელექტროლიტების კუთრი ელექტროგამტარებლობის გაზომვა;

7. ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ყველა სქემისათვის განსაზღვრულია მგრძობიარობების მათემატიკური მოდელები და აგებულია გრაფიკები;
8. მიღებულია აბსოლუტური, ფარდობითი ცდომილებების მათემატიკური მოდელები და ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრების ბაზისური სქემების საშუალო კვადრატული ცდომილებები;
9. საშუალოკვადრატული ცდომილების მინიმუმის კრიტერიუმის საფუძველზე ჩატარებულია ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრული სქემების სტრუქტურული ოპტიმიზაცია. შედარებითი ანალიზიდან გამომდინარე მიღებულია, რომ მრავალგრაგნილიანი ტრანსფორმატორების კომპენსაციური სქემები, ინფორმაციული პარამეტრით დენის მიხედვით, იძლევიან საუკეთესო შედეგებს;
10. დამტკიცებულია ადეკვატურობა შემუშავებული ტრანსფორმატორული კონდუქტომეტრული სქემების მათემატიკური მოდელებისა, ექსპერიმენტალურ კონდუქტომეტრულ დანადგარზე;
11. განსაზღვრულია სიხშირეთა ოპტიმალური დიაპაზონები და ხვიათა რიცხვი, ერთტრანსფორმატორიანი და ორტრანსფორმატორიანი სქემებისათვის;
12. განსაზღვრულია, რომ სქემის ოპტიმალური მუშაობისათვის აუცილებელია ხვიების რაოდენობა გავზარდოთ, რადგან იზრდება მაგნიტური ნაკადი, მაგრამ ხვიების დახვევისას აუცილებელია გავითვალისწინოთ, რომ ტოროიდალური გულარას შიდა დიამეტრი მცირდება, რის გამოც მცირდება თხევადი ხვიის დიამეტრი და მცირდება ხელსაწყოთა გაზომვის დიაპაზონი, მაღალი კუთრი ელექტროგამტარებლობის მხარეს;
13. დამუშავებული იქნა თხევადხვიიანი კონდუქტომეტრის პირველადი საზომი გარდამქმნელის (უჯრედის) მათემატიკური მოდელი;
14. დამუშავებული მათემატიკური მოდელის საფუძველზე შედგენილი იქნა ბლოკ-სქემა და პროგრამა, რის საფუძველზეც

განისაზღვრა კონდუქტომეტრული უჯრედის მაქსიმალური მგრძობიარობის შესაბამისი ოპტიმალური კონსტრუქციული და ელექტრომაგნიტური პარამეტრები

1. Андреев В.С., Романов Ю.Р. Расширение рабочего диапазона индуктивных кондуктометрических преобразователей/ТИЗмерительная техника, 1971, № 9. —с. 76.
2. Лопатин Б.А. Кондуктометрия. - Новосибирск; СО АН СССР, 1964. - 280 с.
3. Рабинович Ф.М. Кондуктометрический метод дисперсионного анализа. - Л.:Химия, 1970.-234 с.
4. Лопатин Б. А. Высокочастотное титрование с многозвенными ячейками. - М.:Химия, 1980.-156 с.
5. Родигин Н.М., Коробейникова И.Е. Контроль качества изделий методом вихревых токов. — М.: Машиздат, 1958. - 92 с..
6. Шауб Ю.Б. Кондуктометрия. — Владивосток: Дальнаука, 1996. - 488 с.
7. Жуков Ю.П., Кулаков М.В., Левин А.Л. Кондуктометрические концентра-томеры суспензий. - М.: ГОСНИТИ, 1967. - 128 с.
8. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств.- М.: Машиностроение, 1974. - 462 с.
9. Латышенко К.П. Физические методы неразрушающего контроля. — М.:МГУИЭ, 2000. - 208 с.
10. Андреев В.С. Кондуктометрические методы и приборы в биологии и медицине.- М . : Медицина, 1973.-296 с.
11. Жуков Ю.П., Кулаков М.В. Высокочастотная безэлектродная кондуктометрия.- М . : Энергия, 1968. - 112 с.
12. Михлин Б.З. Высокочастотные ёмкостные и индуктивные датчики. М.: Гос-энергоиздат, 1960. - 72 с.

13. Карандеев К.Б. Методы электрических измерений. - М.: Стройиздат, 1977. -134 с.
14. Бугров А.В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. - М.: Машиностроение, 1982. - 96 с.
15. Лопатин Б.А. Бесконтактная кондуктометрия С-ячейка. Дисс. док. техн. наук.- Новосибирск, Институт Автоматики СО АН СССР, 1967. - 350 с.
16. Первухин Б.С. Универсальные прецизионные лабораторные кондуктометры на базе микропроцессорной техники. Дисс....канд. техн. наук. - М.: МИХМ,1988.-192 с.
17. Л.Р.Нейман.К.С., Демирчян.,”Теоретические основы электротехники”,Учебник для вузов, Том 1, Энергоиздат. 1981 г.
18. Электромагнитный (токовихревой) неразрушающий контроль качества материалов и изделий. — В кн.: Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1969 - 1972 г.г. М.: МЭИ, 1972. - с. 162 - 289.
19. Заринский В. А., Ермаков В.И. Высокочастотный химический анализ. - М.Наука, 1970.-200 с.
20. Ветров В.В. и др. Электронно-технические измерения при физико-химических исследованиях. - Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1979. -272 с.
21. Грилихес М.С., Филановский Б.К. Контактная кондуктометрия. Теория и практика метода. -Л.: Химия, 1980. - 176 с.
22. Нестеренко А.Д. Основы расчёта электроизмерительных схем уравновешивания.- К.: Изд-во АН УССР, 1960 - 716 с.
23. Худякова Т.А., Крешков А.П. Кондуктометрический метод анализа. - М.Высшая школа, 1975. - 207 с.

24. Леви Л.И., Китаев Я.А., Григорян С.А. Приборы для кондуктометрического титрования/УЗаводская лаборатория, 1977, № 6. — с. 659 — 660.
25. Лопатин Б.А. Теоретические основы электрохимических методов анализа. -М.: Высшая школа, 1975. — 296 с.
26. Klug O, Lopatin B.A. New developments in conductmetric and oscillometric analysis, Amsterdam, 1988. — p.313
27. Атабеков Г.И., "Теоретические основы электротехники", ч.1, "Линейные электрические цепи", Учебник для вузов, Ж." Энергия", 1978 г. Ст.592.
28. Белопольский И.И., Пикалова Л.Г. Расчёт трансформаторов малой мощности. - М.: Госэнергоиздат, 1963. - 272 с.
29. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1983.—320с.
30. თ.მუსელიანი, გ.მუსელიანი, ნ.ლებანიძე. სამგრანდიანი ტრანსფორმა-ტორული საზომი ბოგირის ეკვივალენტური სქემა მჭიდრო ინდუქციური კავშირით. ჟ."ინტელექტუალი", № 15, 2011 წ. გვ.137-143.
31. თ.მუსელიანი, ნ. ლებანიძე-ასათიანი, ვ. შავთვალიშვილი, "კონდუქტომეტრის მგრძობიარობის მაგნიტურ მასალაზე დამოკიდებულების გამოკვლევა", ჟურ."ინტელექტუალი", 21, 2012წ. გვ.180-185.
32. Кораблёв И.В., Латышенко К.П., Козлов В.Р. Методика оценки качества бесконтактных емкостных кондуктометров на основе критерия среднеквадратичных погрешностей. — В кн.: Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов, Ярославль, 1981, 223-231 с.

33. Фатеев Д.Е. Разработка и исследование микропроцессорного трансформаторного кондуктометра, работающего по принципу жидкостного вткка. Дисс. канд. техн. наук, - Московский Государственный Университет Инженерной экологии.-2010, -200 с.
34. Абурджания А.Н., Муселиани Т.Г., Никурадзе Н.А., Котия К.А., “О чувствительностимостовых измерительных схем”, Ж.“электричество”, N1, 1985 г. Ст.50-52.
35. Муселиани Т.Г. Исследование и разработка электрических схем измерительных преобразователей электропроводности. Дисс. канд. техн. наук. – Грузинский Технический Университет. -1993.-190 с.
36. Муселиани Т.Г., “Последовательное соединение индуктивно связанных катушек” Ж.”GeorgianEngineeringNews”, N1, 2004 г. Ст.126-130.
37. ნ.ღებანიძე-ასათიანი. კონდუქტომეტრული გარდამქმნელის შემავალი ტრანსფორმატორის გულარას ოპტიმალური ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობისა და მასალის განსაზღვრა. ჟურ., ინტელექტუალი”, № 22, 2013 წ.
38. Трансформаторные измерительные мосты, Под ред. Карандеева М, Энергия 1970 г.
39. К.М. Соболевский, Ф.Б. Гриневиц, “К вопросу чувствительности моста с тесной индуктивной связью-Электрические методы автоматического контроля”, Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
40. А.Л. Грохольский, К.М. Соболевский, ”Мосты переменного тока с индуктивно связанными плечевыми элементами”, Автометрия, N1, 1965.
41. თ. მუსელიანი, ნ. ღებანიძე-ასათიანი, ა. პოტაპოვი. ძაბვის მიხედვით ტრანსფორმატორული საზომი ბოგირების მაქსიმალური მგრძნობიარობის განსაზღვრისათვის კომპიუტერული პროგრამის დამუშავება. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის შრომების კრებული. ტექნიკური უნივერსიტეტი თბილისი. 2011 წ. გვ. 105-111.