

ირაკლი მეგრელიძე

ძალური ტრანსფორმატორების მაგნიტური სისტემის
მდგომარეობის განსაზღვრის მეთოდები და საშუალებები

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
თვე, 2013

საავტორო უფლება © მეგრელიძე ირაკლი 2013

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით მეგრელიძე ირაკლის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ძალური ტრანსფორმატორების მაგნიტური სისტემის მდგომარეობის განსაზღვრის მეთოდები და საშუალებები“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: სრული პროფ. თ. მუსელიანი

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2013

ავტორი: მეგრელიძე ირაკლი

დასახელება: ძალური ტრანსფორმატორების მაგნიტური სისტემის მდგომარეობის განსაზღვრის მეთოდები და საშუალებები

ფაკულტეტი : ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემოთ მოყვანილი 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.

რეზიუმე

ძალური ტრანსფორმატორი წარმოადგენს ელექტროგადაცემის სისტემის ყველაზე უფრო ძვირადღირებულ ელემენტს. მათი უმეტესობა მრავალი წლის განმავლობაში მუშაობს სხვადასხვა კლიმატურ პირობებში და განიცდის ელექტრომაგნიტური და მექანიკური ბუნების შინაგან და გარეგან ზემოქმედებას. ამიტომ ტრანსფორმატორების ექსპლუატაციის დროს გამორიცხული არ არის აღიმრას სხვადასხვა სახის დეფექტები, რომლებიც სხვადასხვა ხარისხით აისახება მათ მუშაობაზე. ძალური ტრანსფორმატორის მუშაობის ვადის ხანგრძლივობის ზრდასთან ერთად აქტუალური ხდება ენერგოსისტემაში მათი უავარიო მუშაობის საკითხი.

მსოფლიო გამოცდილება გვიჩვენებს, რომ მძლავრი ტრანსფორმატორების შემთხვევითი ავარიით მიყენებული ეკონომიკური ზარალი, რომელიც დაკავშირებულია მხოლოდ ძაბვის შეწყვეტის გამო სამრეწველო საწარმოების გაჩერებასთან განისაზღვრება მილიონობით დოლარებით. უკვე არ ვსაუბრობთ იმ უდიდეს დანახარჯებზე, რომელიც საჭიროა ამ ძვირადღირებული მოწყობილობის მუშაობის უნარიანობის აღსადგენად. ამიტომ ტრანსფორმატორების დროული დიაგნოსტიკა მეტად აქტუალური თემაა.

საზღვარგარეთ ჩატარებულმა სტატისტიკურმა გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ძალური ტრანსფორმატორის მტყუნების ალბათობა წელიწადში შეადგენს 0,0062. დაზიანების მიზეზები დაკავშირებულია ექსპლუატაციის ცუდ პირობებთან, უხარისხო რემონტსა და მონტაჟთან. მნიშვნელოვან როლს თამაშობს ტრანსფორმატორის კონსტრუქციის ცალკეული ელემენტების ფარული დეფექტები და არასაკმარისი ხარისხის საიზოლაციო მასალები.

ძალური ტრანსფორმატორების ერთ-ერთ ძირითად შემადგენელ ნაწილს წარმოადგენს მისი მაგნიტური სისტემა. ცნობილია მაგნიტური სისტემის დიაგნოსტიკის მეთოდი დაბალი ძაბვების დროს, უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვის გზით. ფაზების მიხედვით ზომავენ დანაკარგებს, ადარებენ ერთმანეთს და წინა მონაცემების შედეგებს. ამასთან ერთად უქმი სვლის დანაკარგის სიდიდე ძლიერ არის დამოკიდებული ტრანსფორმატორის გულარის ნარჩენი დამაგნიტების სიდიდეზე.

ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციის პროცესში შეიძლება წარმოიშვას დეფექტები, რომლებიც განპირობებულია მაგნიტური ველის მოქმედებით მაგნიტური კონსტრუქციების გეომეტრიის ცვლილებით, რომელიც წარმოიშევა მხოლოდ სამუშაო რეჟიმის დროს და ქრება მაგნიტური ველის მოხსნისთანავე. ასეთი დეფექტების გამოვლენა უქმი სვლის დანაკარგების გაზომვით დაბალი ძაბვების დროს, პრაქტიკულად შეუძლებელია, რადგან მიღებული შედეგები არ აჭარბებს დაშვებულ გადახრებს.

ამასთან დაკავშირებით, აქტუალური ხდება ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის ისეთი დიაგნოსტიკური მეთოდის შემუშავება რომელიც დაფუძნებულია ტრანსფორმატორის გულარის ხელოვნურ

დამაგნიტებასა და დაბალი ძაბვების დროს უქმი სვლის დანაკარგის შედეგების მიხედვით დიაგნოსტიკური პარამეტრების განსაზღვრაზე.

ნაშრომის პირველ თავი ეძღვნება ლიტერატურულ მიმოხილვას. მასში განხილულია ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის დეფექტები და მათი განვითარების მიზეზები. ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის დამახასიათებელ დაზიანებად ითვლება ფოლადის ფურცლებს შორის იზოლაციის დარღვევა და გრაგნილებში მოკლედშერთული ხვიების წარმოქმნა. ასევე შესაძლებელია ისეთი დახურული დეფექტების, როგორცაა კონსტრუქციის იზოლირებული ელემენტების დაზიანების ან ტრანსფორმატორის კონსტრუქციის ელემენტების არასწორი დამიწების შედეგად ძირითადი მაგნიტური ნაკადის გარშემო „პარაზიტული“ კონტურების წარმოქმნა.

ლიტერატურული წყაროების ანალიზის საფუძველზე დადგენილია, რომ ასეთ დაზიანებებს აქვთ ღუნედ მიმდინარე განვითარება და ყოველთვის არ გამოვლინდებიან ტიპური გამოცდებისას, რადგან ისინი ვლინდებიან ნომინალური ძაბვების დროს. ასევე ტრანსფორმატორის ავზის გახსნის გარეშე გრაგნილებისა და მაგნიტური სისტემის მდგომარეობის კონტროლის ისეთი ძირითადი მეთოდები, როგორცაა: მოკლედ შერთვის სრული წინაღობის, ფანტვის წინაღობისა და გრაგნილებს შორისი ტევადობის გაზომვა, დაბალძაბვიანი იმპულსებისა და სიხშირული ანალიზის მეთოდების გამოყენებით საკმაოდ მჟღავნდება ტრანსფორმატორის გრაგნილების დეფორმაცია და წანაცვლება, მაგრამ ისინი მგრძნობიარენი არ არიან მაგნიტური სისტემის ცვლილების მიმართ. კვლევის ვიზრაციული მეთოდი საშუალებას იძლევა განისაზღვროს გრაგნილების დაწნეხვის მდგომარეობა, მაგრამ მას არ შეუძლია წარმოქმნილი „პარაზიტული“ კონტურების გამოვლენა. მუშაობაში მყოფი ტრანსფორმატორის თბოვიზორული გამოკვლევა იძლევა „პარაზიტული“ კონტურების გამოვლენის საშუალებას. დენისა და უქმი სვლის დანაკარგების გაზომვის არსებული მეთოდი მგრძნობიარეა გრაგნილების დაზიანებისა და მაგნიტური გამტარის დეფექტების მიმართ. ამასთანავე ამ მეთოდის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს ტრანსფორმატორის გულარას ნარჩენი მაგნეტიზმის გავლენა გაზომვის შედეგზე და ერთი დიაგნოსტიკური პარამეტრი, რომლის მიმართაც შეუძლებელია დეფექტის იდენტიფიკაციის ჩატარება.

ნაშრომის მეორე თავი ეძღვნება შედეგებსა და მათ განსჯას, სადაც განხილულია დეფექტების გავლენა გაზომილი პარამეტრების სიდიდეებზე და მათი ინფორმატიულობის ამაღლების საკითხები, ტრანსფორმატორის გულარას ფერომაგნიტური მასალების ძირითადი თვისებები და მათთან დაკავშირებული დანაკარგები. მოყვანილია მაგნიტოგამტარში ფოლადის ფურცლის იზოლაციის დაზიანების შემთხვევისათვის ჩატარებული დანაკარგების კუთრი ზრდის ანგარიშის შედეგები. ფურცლებში შორისი იზოლაციის დაზიანების შემთხვევისათვის გამოთვლილია გულარის ტემპერატურული რეჟიმი მაგნიტოგამტარის სხეულში ელექტრომაგნიტური არაერთგვაროვნების დროს. ნარჩენი მაგნეტიზმის გავლენის თავიდან

აცილების მიზნით განხილულია მაგნიტოგამტარის ხელოვნური დამაგნიტება მუდმივი დენით. აღწერილია ტრანსფორმატორის ვოლტ-ვატური მახასიათებლები და მათი აპროქსიმაციის მეთოდები. განხილულია ტრანსფორმატორის გულარის არაწრფივი თვისებების გავლენა უქმი სვლის დენის ჰარმონიკებზე და შესაძლო შეფასებები უქმი სვლის დენის ჰარმონიული დენის ცვლილებისა, რომელიც გამოწვეულია მაგნიტურ სისტემაში არსებული დეფექტებით.

ნაშრომის მესამე თავი ეძღვნება ტრანსფორმატორის გულარას ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში გაზომილ დიაგნოსტიკურ პარამეტრებს და უქმი სვლის დანაკარგების გაზომვის სქემებს.

ტრანსფორმატორის გულარას მუდმივი დენით დამაგნიტების რეჟიმში მაგნიტოგამტარის ფოლადში კუთრი დანაკარგები იზრდება ჰისტერეზისა და გრიგალურ დენებზე დანაკარგების გაზრდის გამო. ცენტრალური ღეროს დამაგნიტების დროს მაგნიტური დანაკარგების გაანგარიშების შედეგები გვიჩვენებს, რომ კიდურა ფაზებში მაგნიტური დანაკარგების სიდიდეებს შორის სხვაობა შეიძლება გამოწვეული იყოს არა მხოლოდ ერთი რომელიმე მოკლედშერთული კონტურების წარმოქმნით, არამედ უღლისა და ღეროების შეპირაპირების ადგილზე მაგნიტური წინაღობის ცვლილებით.

განხილულია ტრანსფორმატორის დამაგნიტების რეჟიმში განაპირა ფაზებში უქმი სვლის დანაკარგის მახასიათებლის ასიმეტრია. აღწერილია დიაგნოსტიკური პარამეტრები A_1 (დანაკარგი ჰისტერეზისზე), A_2 (დანაკარგი გრიგალურ დენებზე) და მათი დამოკიდებულება დამაგნიტების დენზე სხვადასხვა დეფექტების დროს. აღწერილია დიაგნოსტიკური მახასიათებელი $sf(m)$, რომელიც გამოხატავს უქმი სვლის დენის სიმძლავრის ჰარმონიკებს, დამაგნიტების სხვადასხვა რეჟიმში და შესაძლებელია მათი გამოყენება ტრანსფორმატორის მდგომარეობის შესაფასებლად.

ნაშრომის მეოთხე თავში განხილულია დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის მათემატიკური მოდელირებისა და ძალურ ტრანსფორმატორში განვითარებადი დეფექტების განსაზღვრის საკითხები.

მათემატიკური მოდელირება წარმოადგენს ადამიანის მიერ გარე სამყაროს მოვლენების შეცნობის ერთ-ერთ ძირითად ინსტრუმენტს. მისი ფართო გამოყენება საშუალებას იძლევა აიწიოს თეორიული გამოკვლევების საერთო დონე, ჩატარდეს ისინი ექსპერიმენტულ გამოკვლევებთან მჭიდრო კავშირში.

ნაშრომში შედგენილია დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის ისეთი მათემატიკური მოდელი, რომელიც სრულად ასახავს მასში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს. განტოლებათა სისტემის ამოსახსნელად შედგენილია ბლოკ-სქემა.

ამავე თავში მოყვანილია ჩემს მიერ დამუშავებული ძალურ ტრანსფორმატორში განვითარებადი დეფექტების განსაზღვრის ალგორითმი, რომელიც საშუალებას იძლევა ქრომატოგრაფიული ანალიზის მონაცემების მიხედვითა და სპეციალური დიაგნოსტიკური ცხრილების

გამოყენებით განსაზღვრული იქნეს დეფექტის განვითარება, მისი გამომწვევი მიზეზი და მოსალოდნელ შედეგი.

Abstract

Power transformer is the most expensive component of power transmission system. Most of them operate in different climatic conditions for many years and have internal and external influence of electromagnetic and mechanical nature. Therefore, it is possible to appear various defects, which influence their operation differently. Together with the increase of the operation life of the power transformers the issue of their trouble free operation is becoming urgent in the power system.

The world experience shows, that economic losses caused by the accidental failure of the powerful transformers, which is connected only with the suspension of work of the manufacturing enterprises due to the voltage disconnection, amount to the million dollars, to say nothing of the tremendous expenses necessary for the restoration of the operability of this expensive equipment. Therefore timely diagnostics of these transformers is a very urgent issue.

Statistical researches carried out abroad show that probability of failure of the power transformers is 0,0062 in one year. Failures are caused by the bad operation conditions, substandard repair and installation. Important role plays hidden defects of separate elements of the transformer design and low quality insulation materials.

One of the main constituent parts of power transformers is their magnetic system. Method of magnetic system diagnosis at low voltages by means of measuring the no-load losses is known. Losses are measured by phases, compared to each other and to the previous results. At the same time magnitude of the no-load loss strongly depends on the magnitude of the remnant magnetization of the transformer core.

In the process of transformer operation may appear defects caused by change of the geometry of magnetic construction by the action of magnetic field, which appear only during operation conditions and disappear when magnetic field is removed. Detection of such defects by measuring no-load losses at low voltages is practically impossible because the received results do not exceed permissible variations.

In this connection it is urgent to work out diagnostic method for transformer magnetic system, which is based on artificial magnetizing of transformer core and determination of diagnostic parameters according to the results of no-load loss at low voltages.

The first chapter of the work contains literature review. It reviews the defects of magnetic system of transformer and their causes. Characteristic damage of magnetic systems of transformer is considered to be insulation failure and appearance of short circuited coils. Also such hidden defects as the damage of insulated components of design and spurious loops around the main magnetic flow due to the incorrect earthing of the components of transformer design can appear.

On the basis of the literature sources it is determined that such failures have sluggish current development and are not always revealed by typical tests as they are revealed at rated voltages. Also, by use of such main methods of the control of the condition of coils and magnetic system as

measurement of the total resistance, dispersion resistance, interturn capacitance, low-voltage impulses and frequency analysis, deformation and shifting of transformer windings are revealed sufficiently without opening transformer tank. However, they are sensitive to the change of magnetic system.

Vibration method of research enables to determine condition of pressing of the windings. However, it cannot reveal spurious loops. Infrared research of operating transformer enables to reveal spurious loops. The existing method of measuring current and no-load losses is sensitive to the failures of windings and defects of magnetic conductor. At the same time the negative side of this method is influence of remnant magnetism of coil on the measurement result and also one diagnostic parameter a defect of which is impossible to reveal.

In the second chapter reviews the results and their discussion. The influence of the defects on the measured magnitudes of parameters and increase of their informativity, main qualities of ferromagnetic materials of transformer coil and the losses connected with them are reviewed. The results of calculation of specific increase of the losses in case of failure of insulation of steel sheet in magnetic conductor are given. In case of failure of intersheet insulation temperature regime of the core in case of electromagnetic inhomogeneity in the body of magnetic conductor is calculated.

With the view of avoiding influence of magnetism artificial magnetization with a direct current is reviewed. Volt-Watt characteristics of transformer and the methods of their approximation are described. Influence of nonlinear qualities of transformer core on no-load current harmonics and possible assessments of the harmonic changes of idle-current, which is caused by the defects in the magnetic system are described.

The third chapter of the work reviews the parameters measured in the magnetization regime of transformer core and the schemes of measuring of no-load losses.

In the regime of magnetization the transformer core with the direct current specific losses increase in the steel of the magnetic conductor due to the increase of the losses on the hysteretic and vortex currents. The results of calculation at magnetizing of the central axis show that the difference between the magnitudes of magnetic losses in the opposite phases can be caused not only by appearing one of the short circuited loops but also change of magnetic resistance at the place of butting the yoke and rods.

Asymmetry of characteristic of no-load losses in the magnetization regime of transformer is reviewed. Diagnostic parameters A_1 (hysteresis losses), A_2 (eddy-current losses) and their dependence on magnetizing current at different defects are described. Diagnostic characteristic $sf_{(m)}$ is described, which denotes harmonics of current power of in different magnetization regime and can be used for assessing condition of transformer.

In the fourth chapter of the work issues on mathematical modeling of loaded three-phase transformer and determining of arising defects in the power transformers are reviewed.

Mathematical modeling is one of the main instruments for understanding phenomena of the external world. Its wide application enables us to increase general level of theoretical researches, to carry out them in close connection with experimental researches.

Mathematical model of three-phase transformer completely describing physical processes in it is given in the work. A block diagram for solution of equation system is drawn up.

Algorithm of determination of the defects in power transformer developed by me is given in the same chapter, which enables us to determine developing of the defect, its cause and expected result by use of data of chromatographic analysis and special diagnostic tables.

შინაარსი

სატიტულო გვერდი	I
ხელმოწერების გვერდი.....	II
საავტორო უფლების გვერდი.....	III
რეზიუმე (ორენაზე).....	IV
შინაარსი.....	IX
ცხრილების ნუსხა.....	XIII
ნახაზების ნუსხა.....	14
შესავალი.....	16
თავი I. ლიტერატურის მიმოხილვა	
1.1 ტრანსფორმატორის მაგნიტური სიტემის დეფექტები და მათი განვითარება	21
1.2 ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის დიაგნოსტიკის მეთოდი.....	27
1.2.1. მოკლე შერთვის სრული წინაღობის გაზომვის მეთოდი.....	28
1.2.2. გრაგნილებსშორისი ტევადობის და ფანტვის წინაღობის გაზომვის მეთოდი.....	29
1.2.3. დაბალძაბვიანი იმპულსების მეთოდი.....	30
1.2.4. სიხშირული ანალიზის მეთოდი.....	31
1.2.5. ტრანსფორმატორის ვიბრაციული გამოკვლევის მეთოდი.....	33
1.2.6. თბოვიზორული გამოკვლევის მეთოდი.....	38
1.2.7. დენის გაზომვის მეთოდი და უქმი სვლის დანაკარგი.....	39
1.3. უქმი სვლის დანაკარგები გაზომვის მეთოდის თავისებურებანი დაბალი ძაბვების დროს.....	40
1.4. დანაკარგების ძირითადი სახეები ტრანსფორმატორებში.....	43
1.5. დანაკარგი მაგნიტოგამტარში ფოლადის ფირფიტის იზოლაციის დაზიანების დროს.....	46
თავი II . შედეგები და მათი განსჯა. დეფექტების გავლენა გაზომილი პარამეტრების სიდიდეებზე და და მათი ინფორმატიულობის ამაღლება	
2.1. ელექტრომაგნიტური არაერთგვაროვნება მაგნიტოგამტარის სხეულში.....	50
2.2. მაგნიტოგამტარის ხელოვნური დამაგნიტება.....	55
2.3. ტრანსფორმატორის ვოლტ-ვატური მახასიათებლები.....	57
2.4. ვოლტ-ვატური მახასიათებლის აპროქსიმაცია.....	59
2.5 ტრანსფორმატორის უქმის სვლის დენის ჰარმონიული მდგენელი	65
თავი III. დიაგნოსტიკური პარამეტრები, რომლებიც გაზომილია ტრანსფორმატორის გულარის ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში	
3.1. უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვა ტრანსფორმატორის გულარის	

ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში.....	69
3.2. სამფაზა მაგნიტური სისტემის ელემენტებში ინდუქციურობის განსაზღვრა გულარის მუდმივი დენით დამაგნიტების დროს.....	73
3.3. უქმი სვლის დანაკარგის განსაზღვრა მცირე ძაბვების დროს ერთ-ერთი დეროს მუდმივი დენით დამაგნიტების რეჟიმში.....	78
3.4. ტრანსფორმატორის გაბარიტური ზომების გავლენა უქმი სვლის დანაკარგებზე.....	82
3.5. ტრანსფორმატორის განაპირა ფაზების უქმი სვლის დანაკარგების მახასიათებლების ასიმეტრია დამაგნიტების რეჟიმში.....	86
3.6 დიაგნოსტიკური პარამეტრები A_1 და A_2	88
3.7 დიაგნოსტიკური პარამეტრი $Sf_{(m)}$	93
თავი IV. დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის მათემატიკური მოდელი.....	96
4.1. დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის რეალური განტოლებათა სისტემის ამოხსნის ბლოკ-სქემა.....	103
4.2. ძალურ ტრანსფორმატორში განვითარებადი დეფექტების განსაზღვრის ალგორითმი.....	104
4.3. ძალური ტრანსფორმატორების საიმედოობის მაჩვენებლების ანგარიში.....	114
დასკვნები.....	122
ლიტერატურა.....	126

ცხრილების ნუსხა

- ცხრილი # 4.1. 108გვ. ზეთის ერთეულოვან მოცულობაში აირების კონცენტრაციის მნიშვნელობები
- ცხრილი # 4.2. 108 გვ. ნორმებით განსაზღვრული პარამეტრები
- ცხრილი # 4.3. 109 გვ. კავშირი ნიშანთა ნაკრებსა და რეკომენდაციების ნაკრებს შორის
- ცხრილი # 4.4. 111გვ. ზეთში გახსნილი აირების შედეგების საფუძველზე კონკრეტული გამოცდების პრიორიტეტულ ჩატარებაზე რეკომენდაციები
- ცხრილი # 4.5. 113 გვ. დეფექტების სახეები
- ცხრილი # 4.6. 114 გვ. დაზუსტებული დეფექტების სახეები

ნახაზების ნუსხა

- ნახ.1.1. 24გვ. კონტურების ჩამოყალიბება აქტიურ ფოლადში
- ნახ.1.2. 25გვ. ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის დამწნებ საქუსლესა და რგოლს შორის იზოლაციის მთლიანობის დარღვევის დროს "პარაზიტული კონტურის" წარმოქმნა
- ნახ.1.3. 25გვ. ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის დამწნები ქუსლის მეტალის გადნობა დამწნებავ ფებთან, რომელიც გამოწვეულია "პარაზიტულ" კონტურში დენის ცირკულაციით
- ნახ.1.4. 26გვ. ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის დამწნები რგოლი გამდნარი მეტალის ნაწილაკები, მაიზოლირებელი საქუსლების დაზიანებით
- ნახ.1.5. 26გვ. ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის ხვიების მოკლე შერთვისას ქაღალდის იზოლაციის ამოწვა
- ნახ.1.6. 47გვ. ფირფიტებად დაყოფილი მაგნიტოგამტარის ნაწილი
- ნახ.1.7. 48გვ. აქტიური დანაკარგების ზრდის დამოკიდებულება დამოკლებული ფირფიტების წილზე
- ნახ. 2.1. 51გვ. მაგნიტური ინდუქციის ხაზები მაგნიტოგამტარში
- ნახ. 2.2. 52გვ. მაგნიტოგამტარის ღეროში ტემპერატურული რეჟიმის გასაანგარიშებელი სქემა "ელექტრომაგნიტური ლინზის" წარმოქმნის დროს.
- ნახ. 2.3. 54გვ. "ელექტრომაგნიტური ლინზის" ტემპერატურის დამოკიდებულება რადიუსზე $\exists 12, \exists 43$ მარკის ფოლადისათვის
- ნახ.2.4. 56გვ. ჰისტერეზისის კერძო ციკლი მუდმივი დენით დამაგნიტებისას
- ნახ. 2.5. 58გვ. ТДН-25000/110 ტრანსფორმატორის ვოლტ-ვატური მახასიათებელი
- ნახ. 2.6. 58გვ. ТДН-25000/110 ტრანსფორმატორის ვოლტ-ვატური მახასიათებლების დამაგნიტების მუდმივი დენის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის, როცა დამოკლებულია ხ ფაზა
- ნახ. 2.7. 60გვ. ტრანსფორმატორის ჩანაცვლების სქემა ჰისტერეზისის და გრიგალური დენების დანაკარგების გასაყოფად
- ნახ.2.8. 61გვ. გულარის მასალაში გრიგალური დენებით გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები
- ნახ.2.9. 62გვ. ჰისტერეზისის კერძო ციკლის შეცვლა ექვივალენტური ელიფსით
- ნახ.3.1. 72გვ. ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში გაზომვების ჩატარების სქემა.
- ნახ.3.2. 73გვ. 3340 ფოლადის ჰისტერეზისის კერძო მარყუჟები შეთავსებული ცენტრებით სხვადასხვა დამაგნიტების დენის დროს
- ნახ.3.3. 77გვ. ტრანსფორმატორის ღეროებში მაგნიტური ინდუქციის განაწილება მარცხენა განაპირა (A ფაზის) ღეროს დამაგნიტებისას

- მაგნიტური სისტემის C ფაზის კაზმის ასიმეტრიისას
- ნახ.3.4. 77გვ. ტრანსფორმატორის ღეროებში მაგნიტური ინდუქციის შუა (B ფაზის) ღეროსდამაგნიტებისას მაგნიტური სისტემის C ფაზის კაზმის ასიმეტრიისას
- ნახ.3.5. 78გვ. ტრანსფორმატორის (ღეროებში) მაგნიტური ინდუქციის განაწილება მარჯვენა განაპირა ღეროს (C ფაზის) მაგნიტური სისტემის C ფაზის კაზმის ასიმეტრიისას
- ნახ.3.6. 79გვ. მაგნიტოგამტარში კუთრი მაგნიტური დანაკარგების ზრდის მაგნიტური ველის მუდმივი მდგენელის სიდიდეზე დამოკიდებულების მაგალითი და მისი მაპროქსიმირებელი მრუდი
- ნახ.3.7. 81გვ. ТРДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის მაგნიტური დანაკარგის საანგარიშო დამოკიდებულება მუდმივ დამაგნიტებელი დენის სიდიდეზე C ფაზის მაგნიტური სისტემის კაზმის ასიმეტრიისას
- ნახ. 3.8 82გვ. ТДТН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დანაკარგის დამაგნიტების მუდმივი დენის სიდიდეზე ცდით მიღებული დამოკიდებულება
- ნახ. 3.9 83გვ. ორი ტრანსფორმატორის ზომების შედარება კონსტრუქციული β პარამეტრის სხვადასხვა მნიშვნელობისას
- ნახ.3.10. 84გვ. K_{ba} ფარდობის გამოსათვლელი დამოკიდებულება β -ს სხვადასხვა მნიშვნელობისას
- ნახ. 3.11 85გვ. K_{ba} ფარდობის გამოთვლის დამოკიდებულება β კონსტრუქციულ პარამეტრზე 4000 მა დამაგნიტების დენის დროს
- ნახ.3.12. 85გვ. K_{ba} ფარდობის ცდისეული დამოკიდებულება დამაგნიტების მუდმივ დენზე ТДТН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის
- ნახ.3.13. 90გვ. მახასიათებელი $A_1 = f(I_{\text{დამ}})$ (დანაკარგები ჰისტერეზისზე) ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის დამაგნიტების რეჟიმში
- ნახ.3.14. 90გვ. მახასიათებელი $A_2 = f(I_{\text{დამ}})$ (დანაკარგები გრიგალურ დენებზე) ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის დამაგნიტების რეჟიმში
- ნახ.3.15. 91გვ. ჰისტერეზისზე (A_1) და გრიგალურ დენებზე (A_2) დანაკარგების ცვლილების დამოკიდებულება დამაგნიტების დენზე ნორმალურ მდგომარეობაში ТМ – 100/10 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის მოკლედ შერთული კონტურის დროს
- ნახ.3.16. 92გვ. მოკლედ შერთული კონტურის გავლენა დიაგნოსტიკების

- A_1/A_2 პარამეტრზე TM – 100/10 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის დამაგნიტების დენების სხვადასხვა მნიშვნელობებისას
- ნახ.3.17 94გვ. ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენის ჰარმონიკის სიმძლავრის მუდმივი დამაგნიტებელი დენის სიდიდეზე დამოკიდებულება
- ნახ.4.1. 97გვ დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის მაგნიტური ნაკადის მიმართულებანი
- ნახ.4.2. 104გვ. სამფაზა ტრანსფორმატორის განტოლებათა სისტემის ამოხსნის ბლოკ-სქემა
- ნახ.4.3. 117გვ. ტრანსფორმატორული მოწყობილობის მდგომარეობის გრაფა
- ნახ.4.4. 120 გვ. ტრანსფორმატორის მზადყოფნის ფუნქციის $K_{\text{გვ}}(t)$ მახასიათებელი დროში
- ნახ.4.5. 120გვ. ტრანსფორმატორის ფარული დეფექტის მდგომარეობის ყოფნის ალბათობა (S_2)
- ნახ.4.6. 120გვ. ტრანსფორმატორის შეფერხების შემდეგ აღდგენის მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობა (S_3)
- ნახ.4.7. 120გვ. ტრანსფორმატორის გეგმიურ-ტექნიკურ მომსახურების მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობა (S_4)
- ნახ.4.8. 120გვ. ტრანსფორმატორის გეგმიურ ავარიულ-აღდგენითი შეკეთების მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობა (S_5)
- ნახ.4.9. 120გვ. ტრანსფორმატორის არაგეგმიური ავარიულ--აღდგენითი შეკეთების მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობა (S_6)

შესავალი

სამუშაოს აქტუალურობა. ძალური ტრანსფორმატორი წარმოადგენს ნებისმიერი ქვესადგურის ყველაზე უფრო ძვირადღირებულ ელემენტს. მათი უმეტესობა მრავალი წლის განმავლობაში მუშაობს სხვადასხვა კლიმატურ პირობებში და განიცდის ელექტრომაგნიტური და მექანიკური ბუნების შინაგან და გარეგან ზემოქმედებას. ამიტომ ტრანსფორმატორების ექსპლუატაციის დროს გამორიცხული არ არის აღიძრას სხვადასხვა სახის დეფექტები, რომლებიც სხვადასხვა ხარისხით აისახება მათ მუშაობაზე. ძალური ტრანსფორმატორის მუშაობის ვადის ხანგრძლივობის ზრდასთან ერთად აქტუალური ხდება ენერგოსისტემაში მათი უავარიო მუშაობის საკითხი. ეს თავის მხრივ ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის შესაძლო დეფექტების გამოსავლენად აყენებს ხარისხიანი დიაგნოსტიკის პრობლემებს, რაც ასე აუცილებელია ხანგრძლივად მომუშავე ტრანსფორმატორების შემდგომი ექსპლუატაციისათვის.

მსოფლიო გამოცდილება გვიჩვენებს, რომ მძლავრი ტრანსფორმატორების შემთხვევითი ავარიით მიყენებული ეკონომიკური ზარალი, რომელიც დაკავშირებულია მხოლოდ ძაბვის შეწყვეტის გამო სამრეწველო საწარმოების გაჩერებასთან განისაზღვრება მილიონობით დოლარებით. უკვე არ ვლაპარაკობთ იმ უდიდეს დანახარჯებზე, რომელიც საჭიროა ამ ძვირადღირებული მოწყობილობის მუშაობის უნარიანობის აღსადგენად. ამიტომ ტრანსფორმატორების დროული დიაგნოსტიკა მეტად აქტუალური თემაა [1].

საზღვარგარეთ ჩატარებულმა სტატისტიკურმა გამოკვლევებმა [2] აჩვენა, რომ ძალური ტრანსფორმატორის მტყუნების ალბათობა წელიწადში შეადგენს 0,0062. დაზიანების მიზეზები დაკავშირებულია ექსპლუატაციის ცუდ პირობებთან, უხარისხო რემონტსა და მონტაჟთან. მნიშვნელოვან როლს თამაშობს ტრანსფორმატორის კონსტრუქციის ცალკეული ელემენტების ფარული დეფექტები და არასაკმარისი ხარისხის საიზოლაციო მასალები [3].

ძალური ტრანსფორმატორების ერთ-ერთ ძირითად შემადგენელ ნაწილს წარმოადგენს მისი მაგნიტური სისტემა. ცნობილია მაგნიტური სისტემის დიაგნოსტიკის მეთოდი დაბალი ძაბვების დროს, უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვის გზით. ფაზების მიხედვით ზომავენ დანაკარგებს, ადარებენ ერთმანეთს და წინა მონაცემების შედეგებს. ამასთან ერთად უქმი სვლის დანაკარგის სიდიდე ძლიერ არის დამოკიდებული ტრანსფორმატორის გულარის ნარჩენი დამაგნიტების სიდიდეზე. ნარჩენი დამაგნიტება შეიძლება იყოს ნებისმიერი დონის და იგი დამოკიდებულია მხოლოდ დენის ფაზებზე ტრანსფორმატორის გამორთვის მომენტში.

დანაკარგის საიმედო შედეგების მისაღებად აუცილებელია ტრანსფორმატორის მაგნიტო გამტარის განმაგნიტება. განმაგნიტების პროცედურა წარმოადგენს საკმაოდ რთულ და ხანგრძლივ პროცესს. ნარჩენი

დამაგნიტების უკონტროლობა არ გვადლევს საშუალებას ერთმნიშვნელოვნად დავამტკიცოთ, რომ გულარი განმაგნიტებულია ნარჩენი ინდუქციის ნულოვან მნიშვნელობამდე. ასე რომ უქმი სვლის დანაკარგების გაზომვის შედეგებით შეუძლებელია ცალსახად განისაზღვროს მნიშვნელობების განზნევა არის ნარჩენი დამაგნიტების თუ განვითარებადი დეფექტის შედეგი.

ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციის პროცესში შეიძლება წარმოიშვას დეფექტები, რომლებიც განპირობებულია მაგნიტური ველის მოქმედებით მაგნიტური კონსტრუქციების გეომეტრიის ცვლილებით, რომელიც წარმოიშვება მხოლოდ სამუშაო რეჟიმის დროს და ქრება მაგნიტური ველის მოხსნისთანავე. ასეთი დეფექტების გამოვლენა უქმი სვლის დანაკარგების გაზომვით დაბალი ძაბვების დროს, პრაქტიკულად შეუძლებელია, რადგან მიღებული შედეგები არ აჭარბებს დაშვებულ გადახრებს.

ამასთან დაკავშირებით, აქტუალურად ხდება ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის ისეთი დიაგნოსტიკური მეთოდის შემუშავება რომელიც დაფუძნებულია ტრანსფორმატორის გულარის ხელოვნურ დამაგნიტებასა და დაბალი ძაბვების დროს უქმი სვლის დანაკარგის შედეგების მიხედვით დიაგნოსტიკური პარამეტრების განსაზღვრაზე.

სამუშაოს მიზანი - ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის დიაგნოსტიკური პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდების შემუშავება ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში.

ფორმულირებული მიზნების რეალიზაციისათვის აუცილებელია გადაწყდეს შემდეგი ძირითადი ამოცანები:

1. დამუშავდეს სამფაზიანი ტრანსფორმატორის მაგნიტო გამტარის ხელოვნური დამაგნიტების მეთოდი, დაბალი ძაბვით უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვის მომენტში.

2. განისაზღვროს დიაგნოსტიკური პარამეტრები, რომლებიც გაზომილია ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში.

3. დიაგნოსტიკური პარამეტრების საპოვნელად დამუშავდეს გაზომვის ჩატარებისა და გაზომვის შედეგების დამუშავების ალგორითმები.

4. გამოკვლეული იქნას დეფექტების გავლენა დიაგნოსტიკური პარამეტრების ცვლილებაზე.

5. დამუშავდეს ძალურ ტრანსფორმატორებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების შესაბამისი მათემატიკური მოდელი.

6. მათემატიკური მოდელის საფუძველზე დიაგნოსტიკური პარამეტრების პროგრამული განსაზღვრისათვის შედგენილი იქნას ბლოკ-სქემა.

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. ვოლტ-ვატური მახასიათებლების აპროქსიმაციის შედეგების მიხედვით დამუშავებულია ჰისტერეზისზე და გრიგალურ დენებზე დანაკარგების განსაზღვრის ხერხი;

2. გამოკვლეულია დამაგნიტების რეჟიმში ტრანსფორმატორის კიდურა ფაზების მახასიათებლების ასიმეტრიულობის გავლენა სამფაზა მაგნიტური სისტემის ელემენტებში უქმი სვლის დანაკარგების განაწილებაზე. აღმოჩნდა, რომ კიდურა ფაზებში დანაკარგების განსხვავება შეიძლება გამოწვეული იყოს არა მარტო ერთ რომელიმე ფაზაში მოკლედშერთული კონტურის გამოვლენით, არამედ ღეროსა და ულლის შეპირაპირების ზონაში მაგნიტური წინაღობის ცვლილებითაც.

3. გამოკვლეულია მაგნიტოგამტარის გაბარიტული ზომების გავლენა ცენტრალური ღეროს დამაგნიტებისას უქმი სვლის დანაკარგების კიდურა ღეროების დამაგნიტებისას უქმი სვლის დანაკარგებთან ფარდობაზე. გამოვლენილია, რომ გაჟღენთვის მდგომარეობაში დანაკარგების ფარდობა მცირედ არის დამოკიდებული დამაგნიტების მუდმივ დენზე და ძირითადად დაკავშირებულია მაგნიტური სისტემის გეომეტრიულ ზომებთან;

4. გამოკვლეულია მაგნიტური სისტემის დეფექტების გავლენა ტრანსფორმატორის ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში ჰისტერეზისზე და გრიგალურ დენებზე დანაკარგების მდგენელებზე. გამოვლენილია, რომ დანაკარგების მდგენელების თანაფარდობა იცვლება მოკლედშერთული კონტურების წარმოქმნისას და ფურცლებშორისი იზოლაციის დაზიანებისას.

5. გამოკვლეულია გულარის მედმივი დენით დამაგნიტებისას დეფექტების გავლენა ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენის ჰარმონიულ მდგენელებზე. აღმოჩნდა, რომ მოკლედშერთული კონტურების წარმოქმნისას და ულლის კოჭის დაწნეხვის ხარისხის ცვლილებით უქმი სვლის დენის ჰარმონიკების სიმძლავრე იცვლება.

6. დამუშავებული იქნა ძალურ ტრანსფორმატორებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების შესაბამისი მათემატიკური მოდელი უქმი სვლისა და დატვირთვის რეჟიმში;

პრაქტიკული ღირებულება. სადისერტაციო სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება შემდეგში მდგომარეობს:

1. დამუშავებულია სამფაზა ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარის ხელოვნური დამაგნიტების ხერხი დამატებითი გრაგნილის გამოყენებისა და ავზის გახსნის გარეშე, რაც საშუალებას იძლევა ამაღლდეს დიაგნოსტიკის მეთოდების მგრძნობიარობა;

2. შემოთავაზებულია დიაგნოსტიკური პარამეტრები, რომლებიც ასახავენ დანაკარგებს ჰისტერეზისზე (A_1) გრიგალურ დენებზე (A_2) და ამ დანაკარგების ფარდობას (A_1/A_2);

3. შემოთავაზებულია დიაგნოსტიკური პარამეტრები, რომლებიც ასახავენ ჰისტერეზისზე ($A_1 = f(I_{ფაზ})$) და გრიგალურ დენებზე ($A_2 = f(I_{ფაზ})$) დანაკარგებისა და ამ დანაკარგების ფარდობის ($A_1/A_2 = f(I_{ფაზ})$) დამოკიდებულებას დამაგნიტების მუდმივ დენზე.

4. A_1 (დანაკარგები ჰისტერეზისზე) და A_2 (დანაკარგები გრიგალურ დენებზე) დიაგნოსტიკური პარამეტრების განსაზღვრისათვის ვოლტ-ვატური მახასიათებლების გაზომვის შედეგების მიხედვით დამუშავებულია პროგრამული უზრუნველყოფა;

5. შემოთავაზებულია დიაგნოსტიკური მახასიათებელი ($S = f(I_{დაბ})$), რომელიც ასახავს ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენის ჰარმონიკის სიმძლავრის დამოკიდებულებას დამაგნიტების მუდმივი დენის სიდიდეზე;

6. ძალურ ტრანსფორმატორებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების შესაბამის, დახვეწილ მათემატიკური მოდელს დიდი მნიშვნელობა აქვს ტრანსფორმატორის ოპტიმალური ელექტრული და მაგნიტური პარამეტრების დადგენის საქმეში, რაც საშუალებას მოგვცემს დამზადდეს შემცირებული მასალატევადობის ძალური ტრანსფორმატორები.

პუბლიკაციები. ნაშრომის ძირითადი შედეგები წარმოდგენილი იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის №16 მიმართულების თემატურ სემინარზე, მესამე კოლოქვიუმზე და მოწონებული იქნა.

სადისერტაციო სამუშაოების შედეგები გამოქვეყნებული იქნა ოთხ სამეცნიერო სტატიაში.

სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა სტუ-ს სტუდენტთა ღია 80-ე (2012 წ.) და 81-ე (2013 წ) საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციებზე, 80-ე საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ელექტროტექნიკის, ელექტრონიკის და ელექტრომექანიკის სექცია - II ადგილი.

დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავალისა და ოთხი თავისაგან, რომლებიც გადმოცემულია 129 გვერდზე. შეიცავს 42 ნახაზს, 6 ცხრილს, 36 დასახელების ლიტერატურას.

თავი I. ლიტერატურული მიმოხილვა

1.1 ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის დეფექტები და მათი განვითარება

ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემა ტრანსფორმატორის მაგნიტური ველის ლოკალიზაციისათვის კონსტრუქციული და მექანიკური საფუძველია. იგი წარმოადგენს ელექტროტექნიკური ფოლადისაგან დამზადებულ ფირფიტების კომპლექტს ან სხვა ელემენტებს, რომლებიც აკრეფილია განსაზღვრული გეომეტრიული ფორმით.

მაგნიტური სისტემის მრავალი სახეობა შეიძლება მკაფიოდ დავყოთ ცალკე ნაწილებად. ამ დაყოფის შესაბამისად მაგნიტური სისტემაში გამოყოფენ დეროებს, რომლებზეც განლაგებულია ტრანსფორმატორის ძირითადი გრაგნილები, ისინი ემსახურება ელექტრო ენერჯის გარდაქმნას, მაგნიტური სისტემის შემადგენელი ნაწილია ასევე ულელი, რომელზეც განლაგებული არ არის გულარები, მაგრამ გამოიყენებიან მაგნიტური ნაკადის შეკვრისათვის, ხოლო ზოგიერთი ტიპის ტრანსფორმატორებში მათზე განლაგებულია დამხმარე გრაგნილები.

მაგნიტურ სისტემებში, რომლებიც დაყოფილი არიან გულარებად და ულლებად, ტრანსფორმატორის უქმი სვლის პარამეტრების გათვლის დროს განსაკუთრებულად გამოიყოფა ის ნაწილები, რომლებიც მდებარეობენ გულარის და ულლის შეუღლების ზონაში და იწოდებიან მაგნიტური სისტემის კუთხეებად. გამოთქმა "კუთხე" განისაზღვრება, როგორც მაგნიტური სისტემის ულლის ნაწილი შემოსაზღვრული იმ მოცულობით, რომელსაც ქმნის ერთ-ერთი ულლისა და დეროს გვერდითი ზედაპირების ან მათი გაგრძელებების გადაკვეთა.

ტრანსფორმატორების მშენებლობაში ფართო გავრცელება ჰპოვა დეროვანი ტიპის ბრტყელმა მაგნიტურმა სისტემებმა, რომლის განივკვეთის ფორმა საფეხურებრივია და რომელიც ჩაწერილია წრეში გრაგნილებთან ერთად წრიული ცილინდრების სახით.

მაგნიტურ სისტემას თავისი კვანძებითა და დეტალებით, რომლებიც ემსახურება მისი ცალკეული ნაწილების ერთიან კონსტრუქციულ შეერთებას, ეწოდება ტრანსფორმატორის ჩონჩხი. ჩონჩხზე შემდგომში მაგრდება გრაგნილები და განშტოებები, ანუ გამტარები, რომლებიც განკუთვნილია ტრანსფორმატორის გრაგნილების გადამრთველებთან, შემყვანებთან და სხვა დენგამტარ ნაწილებთან შესაერთებლად.

ჩონჩხის კონსტრუქციამ უნდა უზრუნველყოს ათობით ტონა ფოლადის თხელი ფირფიტებისაგან აკრეფილი მაგნიტური სისტემის საიმედო დამაგრება და მექანიკური სიხისტე. ამიტომ ექსპლუატაციის პროცესში ტრანსფორმატორის ჩონჩხმა უნდა გაუძლოს მნიშვნელოვან მექანიკურ ძალას, რომელიც აღიძვრება გრაგნილებს შორის მოკლე შერთვისას ტრანსფორმატორის მზარდი ნომინალური სიმძლავრის შესაბამისად.

ბრტყელი კაზმური მაგნიტური სისტემის ღეროები მოჭიმულია მინალენტის ბანდაჟებით. მრავალსაფეხურიანი უღელი დაწნეხილია ფოლადის უღლიან კოჭებს შორის და მოჭიმულია ფოლადის ნახევარ ბანდაჟებით. ნახევარ ბანდაჟების სარჭის ბოლოები ქანჩებით გამოყვანილია კოჭას უღლების გარეთა მხარეზე და იზოლირებულია მისგან, რათა თავიდან იქნას აცილებული უღლის ირგვლივ ხვიების მოკლედ შერთვის წარმოქმნა. ზედა და ქვედა უღლიანი კოჭები შეერთებული არიან ვერტიკალური სარჭეებით.

ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის დაზიანების რიცხვს მიეკუთვნება მოკლე შერთვა გრაგნილის ხვიებს შორის და იზოლაციის დარღვევა ელექტროტექნიკური ფოლადის ფირფიტებს შორის.

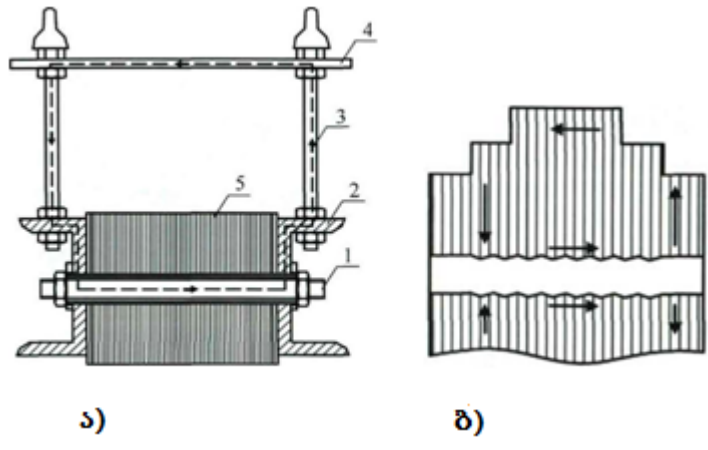
გრაგნილის ხვიებს შორის მოკლედ შერთვა იწვევს სითბური ენერჯის ინტენსიურ გამოყოფას. მრავალ პარალელურ გრაგნილებში სადენების მოკლედ შერთვის დროს და აგრეთვე გრაგნილი ხვიებს შორის გაჩენილი შერთვის დროს, რომელიც გამოწვეულია მზარდი გარდამავალი წინაღობით, ჩნდება გრაგნილების ადგილობრივი გადახურება, რომელიც დროთა

განმავლობაში იწვევს იზოლაციის რღვევას და საბოლოოდ ხვიათა მოკლედ შერთვას.

ფურცლებშორისი იზოლაციის დარღვევას მიყვავართ ცალკეული ფირფიტებს შორის ან კიდევ ფირფიტების მთელი ჯგუფის მოკლე შერთვამდე, რაც იწვევს ადგილობრივ გადახურებასა და მაგნიტოგამტარის ფოლადის ფურცლების ამოწვას. ასევე შესაძლებელია მაგნიტოგამტარის მოსაჭიმი სარჭების იზოლაციის დაზიანება. მეზობელი ფირფიტების იზოლაციის დაზიანება გამოიწვევს დეფექტის არეს გაზრდას. მოცემულ მომენტში პროცესი ვითარდება ზვავისებურად, რაც გამოიწვევს ტრანსფორმატორის სრულ დაზიანებას, რომელიც ცნობილია სახელწოდებით "რკინის ხანძარი".

მაგნიტური სისტემის კონსტრუქციაში ფოლადის პაკეტებისა და გრაგნილების საწნეხი და სამაგრი ელემენტების არსებობა ძირითადი მაგნიტური ნაკადის ირგვლივ ქმნის "პარაზიტული" კონტურების შექმნის წინაპირობას. ტრანსფორმატორის კონსტრუქციის მაიზოლირებელი ელემენტების დაზიანებისა და ჩამიწების ელემენტების არასწორად შესრულების შედეგად.

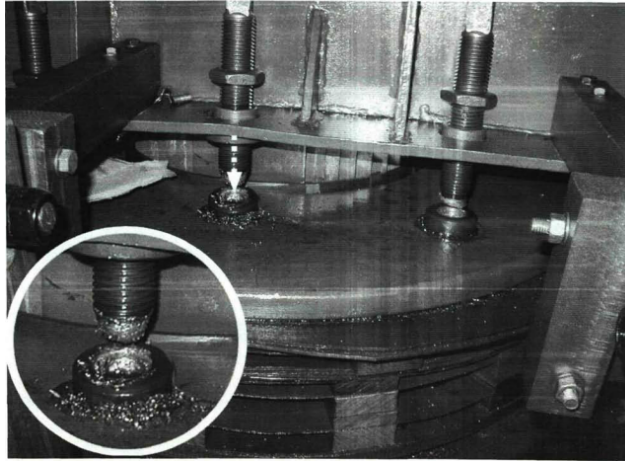
ნახ.1.1-ზე წარმოდგენილია მოსაჭიმი სარჭის იზოლაციის დარღვევისა და ფირფიტების ნაპირების დაზიანების დროს "პარაზიტული" კონტურების წარმოქმნის ნიმუში. კონტურის იზოლაციის დაზიანების ადგილებში დენის გავლის დროს არამჭიდრო კონტაქტის ადგილებში ელემენტებს შორის წარმოიქმნება გახურების ადგილობრივი კერები და ნაპერწკლები, რომლებიც იწვევენ კონსტრუქციის ელემენტების გადაწვას. კონტურები შეიძლება განვითარდეს აგრეთვე უღლის ზედაპირებზე და ხვრელებში იმ ადგილებში, რომლებსაც აქვთ ჩამოწეული ნაპირები, ხიწვები და ტეხილები.



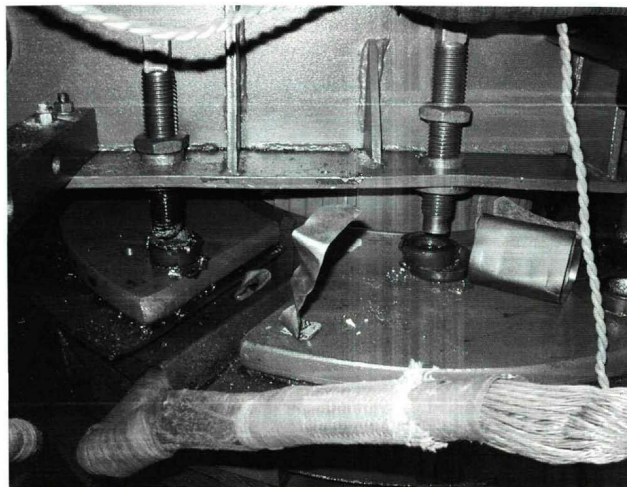
ნახ.1.1. კონტურების ჩამოყალიბება აქტიურ ფოლადში: ა) მოსაჭიმი სარკების იზოლაციის დაზიანებისას; ბ) ფირფიტების ნაპირების დაზიანებისას. 1) მოსაჭიმი სარკი; 2) უღლის კოჭი; 3) სახურავი; 4) მეორე ასაწევი სარკი; 5) უღლის ზედა ნახევარი;

უმეტეს შემთხვევაში ასეთ დაზიანებებს ახასიათებს დუნედ მიმდინარეობა და ტიპური გამოცდის დროს ყოველთვის არ გამოვლინდება. ამასთანავე შესაძლებელია დეფექტების კასკადური განვითარება, რაც იწვევს ტრანსფორმატორის მწყობრიდან სრულად გამოყვანას.

ასე მაგალითად ТДН 25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის დამწნეხი ქუსლისა და დამწნეხი რგოლის მაიზოლირებელი საქუსლის მთლიანობის დარღვევის გამო წარმოიქმნა "პარაზიტული" კონტური, რამაც გამოიწვია ჭანჭიკის ლითონის დნობა და ასევე თვით ფილის შეხების ადგილზე.



ნახ.1.2. ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის დამწნებ საქუსლესა და რგოლს შორის იზოლაციის მთლიანობის დარღვევის დროს “პარაზიტული კონტურის” წარმოქმნა



ნახ.1.3. ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის დამწნები ქუსლის მეტალის გადნობა დამწნეხავ ფეხთან, რომელიც გამოწვეულია “პარაზიტულ” კონტურში დენის ცირკულაციით



ნახ.1.4. ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის დამწნეხი რგოლი გამდნარი მეტალის ნაწილაკები, მაიზოლირებელი საქუსლების დაზიანებით

მაიზოლირებელი საქუსლის დაშლა მოხდა ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის მხარეზე მომხდარი მოკლედ შერთვის შედეგად წარმოქმნილი დინამიური ძაღვების გამო.

შედეგად გამდნარი მეტალი ლითონის ბურთუღების სახით ზეთის ცირკულაციის არხებით ხვდება ხვიებს შორის სივრცეში გრაგნილის დაბალი ძაბვის არეში. მაღალმა საწყისმა ტემპერატურამ გამოიწვია ხვიათა ქაღალდის იზოლაციის ამოწვა, რომელმაც მიგვიყვანა დაბალი ძაბვის გრაგნილის ხვიების მოკლე შერთვამდე.



ნახ.1.5. ТДН -25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის ხვიების მოკლე შერთვისას ქაღალდის იზოლაციის ამოწვა

ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის გულარის დათვალიერების შემდეგ აღმოჩნდა სამი ზედა კოჭის დაზიანება და კოჭის ხვიის გადაწვა ორ ადგილზე. ზეთოვან არხში დაბალი ძაბვის გრაგნილსა და ბაკელიტის ცილინდრს შორის და აგრეთვე კოჭებს შორის არხში, ხვიათა გადაწვის ზონაში აღმოჩენილია დიდი რაოდენობით აალებული ლითონის ბურთულები.

როგორც მოცემული მაგალითებიდან ჩანს, მაგნიტური სისტემის მდგომარეობის დროული დიაგნოსტიკა მოითხოვება არა მხოლოდ პერიოდული შემოწმების დროს, არამედ თითოეული მოკლედ შერთვის დროსაც. არანაკლებ მნიშვნელოვანია დიაგნოსტიკის მეთოდი, რომელიც გამოავლენს დეფექტებს მხოლოდ მუშა მდგომარეობაში ე.ი. ნომინალური ძაბვის დროს.

1.2. ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის დიაგნოსტიკის მეთოდი

დღეისათვის ტრანსფორმატორის ტექნიკური მდგომარეობის შესახებ არსებობს დიაგნოსტიკისა და კონტროლის სხვადასხვა მეთოდები. მაღალი ძაბვის ძალური ტრანსფორმატორების პირდაპირი გამოკვლევისას თავისებურებას წარმოადგენს გრაგნილებისა და მაგნიტოგამტარების მიუწვდომლობა, რაც ძალზედ ართულებს მათი მდგომარეობის კონტროლს.

ტრანსფორმატორის მოწყობილობის ძირითადი ელემენტები, რომლებიც განაპირობებენ მის უავარიო მუშაობას, არის მაგნიტოგამტარები და გრაგნილები [4]. დიაგნოსტიკის არსებული ძირითადი მეთოდი მიმართულია გულარის მდგომარეობის განსაზღვრაზე, ე.ი. მათ გეომეტრიაზე. სხვა არსებული მეთოდები მოწოდებულია გამოავლინოს ცვლილებები, როგორც გრაგნილში, ისე ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარში [7].

ყველაზე მეტად საჭირო და ეფექტურ მეთოდად ძალური ტრანსფორმატორის მოწყობილობების დიაგნოსტიკისათვის გვევლინება შემდეგი მეთოდები:

1. მოკლე შერთვის სრული წინაღობის გაზომვა;
2. განზნევის წინაღობისა და ხვიათა შორის ტევადობის გაზომვა;
3. დაბალძაბვიანი იმპულსების გაზომვა.
4. სიხშირული მახასიათებლების ანალიზი.
5. ტრანსფორმატორის ვიბრაციული გამოკვლევა.
6. თბოვიზორული გამოკვლევა.
7. ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენისა და დანაკარგების გაზომვა.

1.2.1. მოკლე შერთვის სრული წინაღობის გაზომვის მეთოდი

გამორთულ ტრანსფორმატორზე გრაგნილების დეფორმაციის გამოვლენის ყველაზე უფრო ათვისებულ და მარტივ მეთოდს წარმოადგენს მოკლე შერთვის სრული წინაღობის განსაზღვრა. მეთოდი დაფუძნებულია ტრანსფორმატორის ერთ-ერთ გრაგნილში გამავალი დენის გაზომვაზე, როცა მეორე გრაგნილი მოკლედ არის შერთული. გაზომვა ხდება საწარმოო სიხშირის დაბალი ძაბვების დროს. საბოლოო შედეგების მიხედვით გამოითვლება მოკლე შერთვის წინაღობის მნიშვნელობა Z_a .

გრაგნილების დეფორმაციის დროს ფანტვის ინდუქციურობა და შესაბამისად Z_a წინაღობა ისე შესამჩნევად იზრდება, რომ ცვლილება Z_a შეიძლება აღმოვაჩინოთ 0.5% სიზუსტის კლასის ხელსაწყოთი. გრაგნილის დეფორმაცია იწვევს გადანაცვლებული კოჭების ინდუქციურობისა და ტევადობის ცვლილებას, რაც ცვლის გრაგნილის მოკლე შერთვის სრულ წინაღობას Z_a -ს.

Z_a გაზომილი წინააღობის სიდიდის შედარება მოკლე შერთვამდე გაზომილ სიდიდესთან გვაძლევს საშუალებას გამოვავლინოთ გრაგნილის დეფორმაციის ხარისხი.

წუნდების კრიტერიუმად “ელექტრომოწყობილობების გამოცდის ნორმისა და მოცულობის მიხედვით” გვევლინება განსხვავება 3%-ით მოკლე შერთვამდე გაზომილ სიდიდესთან შედარებით, აგრეთვე განსხვავება 3%-ით Z_a ფაზების მიხედვით გრაგნილის ძირითად და კიდურა განშტოებებზე. განსაკუთრებით ეფექტურია Z_a-ს ცვლილების კონტროლი ტრანსფორმატორებისათვის, რომლებიც არასაკმარისად მდგრადია შემკუმშავ რადიალურ დატვირთვაზე.

1.2.2. გრაგნილებსშორისი ტევადობის და ფანტვის წინააღობის გაზომვის მეთოდი

ტრანსფორმატორის გრაგნილის დეფორმაციის კონტროლის ერთ-ერთ გავრცელებულ მეთოდს წარმოადგენს, ფანტვის ინდუქციურობის გაზომვა. დეფორმაციები გამოვლინდება მაქსიმალური ბოგირის დახმარებით ინდუქციურობის პერიოდული გაზომვებით. საწყის მნიშვნელობასთან შედარებით 0.5%-იანი ცვლილება ითვლება ნორმად. კონტროლს მოითხოვს ცვლილება 2.5%-ით, ხოლო 5%-იანი ცვლილების დროს მოითხოვება ტრანსფორმატორის დაწვრილებითი გამოკვლევა.

НИЦ “ЗТЗ-Сервис”-ის პრაქტიკული ცდების საფუძველზე აღინიშნა, რომ ფანტვის წინააღობის გაზომვა ან გრაგნილებსშორისი წინააღობის გაზომვა არასაკმარისად მგრძობიარეა აქსიალური დეფორმაციის, გრაგნილის დაგრეხვის, განცალკევებული კოჭების ლოკალური დეფორმაციის მიმართ.

1.2.3. დაბალძაბვიანი იმპულსების მეთოდი

ტრანსფორმატორის გრაგნილების გადაწევის კონტროლი დაბალძაბვიანი იმპულსების მეთოდით შემუშავებული იქნა 1966 წელს პოლონეთში. დაბალძაბვიანი მეთოდი მდგომარეობს იმაში რომ, სალტებისაგან განთავისუფლებული ტრანსფორმატორის ერთ-ერთი გრაგნილზე მიეწოდება დაბალი ძაბვის (დაახლოებით 100-600 ვ სიდიდის) მომსინჯავი იმპულსი 1მკწ დროის ხანგრძლივობით და ერთდროულად აკვირდებიან დენს მეორე გრაგნილთან მიერთებულ გამზომ შუნტზე. ამ მეთოდით იკვლევენ გარდამავალ პროცესს, რომელიც წარმოიქმნება გრაგნილებზე, როგორც რეაქცია სწორხაზოვანი იმპულსის მოქმედებაზე.

წინასწარ წარმოებს ახალი ან გამართული ტრანსფორმატორის პასორტიზაცია დაბალძაბვიან იმპულსებზე. ასეთი გაზომვები მიმდინარეობს რეგულარულად ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციისა და მოკლე შერთვის შემდეგ [5,6,7].

ამ განსაზღვრული მეთოდიკით შედარებული ოსცილოგრამა, რომელიც ჩაწერილია მოკლე შერთვამდე (ნორმოგრამა) და მოკლე შერთვის შემდეგ (დეფექტოგრამა) გვაძლევს საშუალებას შევაფასოთ ტრანსფორმატორის მდგომარეობა [8]. ცვლილებები ოსცილოგრამებში მოწმობს მექანიკური თუ ელექტრული დაზიანებების არსებობას.

იმპულსური მეთოდის ნაკლად ითვლება მისი მოკლევადიანი ზემოქმედება, შედარებით ცოტა ენერგია მიემართება დეფექტების ამღონებ პროცესებში, გასათვალისწინებელია მოქმედების ფართო სპექტრი და მცირე კუთრი ენერგია სიხშირის დიაპაზონის ერთეულზე. გამოძახილის დამუშავების დროს საჭიროა იგი დამუშავებული იქნას, როგორც დროის ფუნქცია, ანუ დამუშავებული უნდა იქნას გარდამავალი პროცესების ოსცილოგრამები. განხილვისას ასეთი გამოძახილები წარმოადგენენ რაღაც განზოგადოებულ სახეს.

მეთოდი გამოირჩევა გრაგნილების დეფორმაციისადმი მაღალი მგრძობიარობით, ამასთანავე მოითხოვს საწყისი ნორმოგრამის არსებობას, რომელიც გადაღებულია ქარხანაში ან მონტაჟის დროს, ასევე კვალიფიციური პერსონალს გაზომვების ჩატარებისათვის. დაბალმაზიანი იმპულსების ოსცილოგრამები გვაძლევს დეფორმაციების ხარისხიან შეფასებას, მაგრამ ყოველთვის ვერ ხერხდება დაბალმაზიანი იმპულსების მრუდებში ცვლილების ინტერპრეტირება.

1.2.4. სიხშირული ანალიზის მეთოდი

სიხშირული ანალიზის მეთოდი წარმოადგენს დაბალ მაზის იმპულსების მეთოდის განვითარების შედეგს. იგი შეიქმნა 60-იან წლებში ლეხისა და ტიმინსკის მიერ და ფართო გავრცელება ჰპოვა მსოფლიოში ძალური ტრანსფორმატორის გრაგნილის დეფორმაციის დიაგნოსტიკისათვის მოკლე შერთვის დენის ზემოქმედებასთან ერთად. სიგნალის სიხშირული ანალიზის მეთოდი იძლევა გრაგნილში ნარჩენი დეფორმაციის რაოდენობრივად შეფასების საშუალებას და ნაკლებად არის დამოკიდებული გაზომვების სქემაზე, ანუ არ არის დამოკიდებული გასაზომი კაბელების ურთიერთ განლაგებაზე, გასაზომ ობიექტთან ახლოს სალტების გავლენაზე, გარე დაბრკოლებებზე მოქმედი ქვესადგურისა და სხვა ფაქტორების პირობებში.

სიხშირული მეთოდის არსი შემდეგში მდგომარეობს: სპეციალური გენერატორიდან გრაგნილის შემყვანს გადაეცემა ზონდირებული სიგნალი (იმპულსური ან სინუსოიდური), ხოლო სხვა გრაგნილების გამომყვანთან რეგისტრირდება გამომახილი-ანუ გრაგნილის რეაქცია ზონდირებული სიგნალის ზემოქმედებაზე. გრაგნილის გეომეტრიის ნებისმიერი ცვლილება, რომელიც გამოწვეულია დეფორმაციით, წანაცვლებით, დაგრეხვის ან დაწნეხვის შემცირების გამო ხდება შესაბამისი ტევადობისა და ინდუქციურობის ცვლილება, რაც ნიშნავს გრაგნილის რეაქციის

ცვლილებას ზონდირებული სიგნალის ზემოქმედებაზე. სიხშირული სპექტრის ცვლილების ხასიათი დამოკიდებულია დეფორმაციის ხასიათზე და სიდიდეზე.

მოცემული მეთოდის რეალიზაციის დროს შეიძლება ვისარგებლოთ ორი მიდგომით: იმპულსური და სიხშირული.

იმპულსურ მეთოდში ზონდირებული სიგნალის წყაროდ გამოიყენება დაბალძაბვიანი იმპულსების გენერატორი (სტანდარტული, ორმაგი ექსპონენციალური სწორხაზოვანი).

ორარხიანი ანალოგურ-ციფრული გარდამქნელი ერთდროულად იწერს ორ სიგნალს: პირველი არხი-შემავალ სწორხაზოვან ზონდირებულ იმპულსს, მეორე არხი-გარდამავალ იმპულსურ დენს-გრაგნილის რეაქციას მოდებულ იმპულსზე. შემდგომში, არჩეული ალგორითმის ანალიზის მიხედვით ჩაწერილი შემავალი სიგნალისა და მისი გამოძახილის ანალიზი წარმოებს სპექტრალური სიმკვრივის გამოთვლით [9].

სიხშირულ მეთოდში ზონდირებული სიგნალის წყაროს წარმოადგენს სინუსოიდალური ძაბვის გენერატორი, რომლის ძაბვის სიხშირე იცვლება ფართო დიაპაზონში რამდენიმე ჰერციდან რამდენიმე მეგაჰერცამდე. ორარხიანი ანალოგურ - ციფრული გარდამქნელი პირველი არხით იწერს სიგნალს, რომელიც მოდებულია გრაგნილის შესასვლელზე, მეორე არხით-გრაგნილის რეაქცია მოდებულ ზემოქმედებზე. შემდეგ ანალოგიურად გამოითვლება გადაცემის ფუნქცია, როგორც შემსვლელი და გამომსვლელი სიგნალების სპექტრთა დამოკიდებულება. გადაცემის ფუნქციის განსხვავების ხარისხი, რომელიც გამოთვლილია ტრანსფორმატორის მოკლე შერთვის ელექტროდინამიკური ძალის ზემოქმედებამდე და მის შემდგომ წარმოებს ანალიზის სხვადასხვა საშუალებების დახმარებით პროგრამული უზრუნველყოფის ფარგლებში.

მეთოდის მაღალი მგრძობელობა აიხსნება იმით, რომ გრაგნილისა და სამაგრი ელემენტების (ხვიების, კოჭების, განშტოებების) უმნიშვნელო ლოკალური ცვლილება იწვევენ შესაბამისი ტევადობისა და

ინდუქციურობის უეცარ ცვლილებებს და შესაბამისად გრაგნილის საკუთარი რხევის სიხშირის ცვლილებასაც. დეფორმაციის სხვადასხვა სახეებს მივყავართ სიხშირული სპექტრის სხვადასხვა დიაპაზონში ცვლილებამდე.

გამორთული ტრანსფორმატორის დიაგნოსტიკებისათვის გამოიყენება ადრე მოხსნილი გრაგნილის სიხშირული მახასიათებლების შედარება იმავე ტიპის ტრანსფორმატორის გრაგნილთან.

შტუტგარტის უნივერსიტეტში დამუშავებულია ძალური ტრანსფორმატორის კონტროლის სქემა, რომლის დროსაც იზომება გრაგნილზე ძაბვის ფორმა კომპუტაციურ და მგრგვინავი იმპულსების დროს. გაზომვები შეიძლება ჩატარდეს გამოსაცდელ მოწყობილობაზე როგორც ქსელიდან გამორთულ ტრანსფორმატორზე, ასევე მისი ქსელში ჩართვის დროს [10].

1.2.5. ტრანსფორმატორის ვიბრაციული გამოკვლევის მეთოდი

ტრანსფორმატორის ვიბრაციული გამოკვლევა საშუალებას გვაძლევს ავზისა და ზეთის ტუმბოების გახსნის გარეშე, ოპერატიულად შევაფასოთ მისი აქტიური ნაწილების მიმდინარე ტექნიკური მდგომარეობა, განისაზღვროს მომატებული ვიბრაციის მიზეზები და რაც ყველაზე მნიშვნელოვანია, დროულად გამოავლინოს როგორც მთლიანად ტრანსფორმატორისა, ასევე გულარისა და გრაგნილის ცალკეული ფაზების ტექნიკური მდგომარეობის გაუარესება.

არსებობს ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ტექნიკური მდგომარეობის ვიბრაციული დიაგნოსტიკის რამდენიმე მეთოდი: ვიბრაციული დონის გაზომვა ტრანსფორმატორის ავზის კედელზე, ვიბრაციული დიაგნოსტიკის სპექტრული მეთოდი და გრაგნილის დაწნეხვის დონის კონტროლის სიხშირული მეთოდი.

ტრანსფორმატორის ავზის კედელზე ვიბრაციული დონის გაზომვისა და ვიბროდიაგნოსტიკის სპექტრული მეთოდის გამოყენება ხდება ჩართულ ტრანსფორმატორზე. კონტროლის სიხშირული მეთოდი გამოიყენება გამორთულ და სალტეებისაგან განთავისუფლებულ ტრანსფორმატორზე.

ტრანსფორმატორის ავზის კედელზე ვიბრაციული დონის გაზომვა ყველაზე მეტად ინფორმაციული და პარამეტრებით განზოგადოებულია, რომელიც შეიძლება გამოყენებული იქნას მოწყობილობის მიმდინარე ტექნიკური მდგომარეობის შეფასებისათვის და გაზრდილი ვიბრაციის მიზეზის დიაგნოსტიკისათვის.

უწყესივრობის განვითარებასთან ერთად ხდება დინამიური პროცესების ცვლილება. წარმოიშობა ტრანსფორმატორის დეტალებზე მოქმედი ძალების ხარისხობრივი და რაოდენობრივი ცვლილება. შედეგად იცვლება მექანიკური რხევების, როგორც დონე ასევე მისი ფორმა.

ფიზიკური თვალსაზრისით ძალური ტრანსფორმატორის ავზის ზედაპირზე ვიბრაცია ხარისხობრივად და რაოდენობრივად კარგ დამოკიდებულებაშია გრაგნილის დაწნეხვის მდგომარეობასთან და მაგნიტოგამტარებთან. ექსპლოატაციის პროცესში დაწნეხვის ხარისხის ცვლილება იწვევს საერთო ვიბრაციული სურათის ცვლილებას, ვიბრაციის გაძლიერებას, მისი სიხშირის ცვლილებას, მოდულირებული რხევის გაჩენას.

ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ტექნიკური მდგომარეობა კონტროლდება შემდეგი ვიბრაციული მახასიათებლებით: ვიბროაჩქარება, ვიბროსიჩქარე, ვიბროგადაადგილება. ვიბროსიგნალების რაოდენობრივად აღწერისათვის უფრო ფართოდ გამოიყენება ვიბროსიჩქარისა და ვიბროგადაადგილების მეთოდები. ვიბროაჩქარების, ვიბროსიჩქარის, ვიბროგადაადგილების გაზომვებისას გამოიყენება გადასატანი სპექტრო ანალიზატორები, მარეგისტრირებელი სიგნალით ვიბროგადაამწოდინან. ვიბრაციის გასაზომად გამოიყენება გადატანითი ვიბროანალიზატორი, რომელიც არის ვიბროაჩქარების ან ვიბროსიჩქარის რეჟიმში, ან

ვიბროგადაადგილების საშუალო კვადრატული მნიშვნელობა. ტრანსფორმატორის ვიბრაციული გამოკვლევის დროს მიღებულ შედეგებს, აგრეთვე წინა გაზომვათა შედეგებს შეადარებენ ერთმანეთს.

პრაქტიკაში არსებული ვიბროსიგნალების უმეტესობა თავისი გარეგნული ფორმით ჩვეულებრივ გვევლინება ძალიან რთულად და დიაგნოსტიკისათვის სასარგებლო ინფორმაციასთან ერთად, გააჩნიათ ბევრი უსარგებლო და ხმაურის ინფორმაცია. ვიბროდიაგნოსტიკის სპექტრალური მეთოდის დროს, საწყისი ინფორმაციის მოცულობის შემცირების კომპენსაციის მიზნით საწყისი ვიბროსიგნალი დროებით არეში გარდაიქმნება სიხშირულად, სადაც წარმოდგენილია განსხვავებული სიხშირისა და ამპლიტუდის ჰარმონიკების ერთობლიობა.

ტრანსფორმატორის ავზის ზედაპირზე დარეგისტრირებული ვიბროსიგნალების სპექტრს აქვს თავის შემადგენლობაში 2-დან 10-მდე ინფორმაციული ჰარმონიკები. სპექტრის ინფორმაციული ნაწილი უმეტესად იმყოფება 100-დან 700ჰც-მდე დიაპაზონში.

100ჰც-ზე ნაკლებ სიხშირულ ზონაში, ძირითადად თავმოყრილია ის ვიბრაციები, რომლებიც გამოწვეულია გაგრილების სისტემის ვენტილატორებით და ზეთის ტუმბოებით. აქვე ჩვეულებრივ განთავსებულია ავზის კონსტრუქციის ელემენტების საკუთარი რეზონანსული სიხშირეების რეზონანსული პიკი. მაგნიტოგამტარისა და გრაგნილის დაწნეხვის მდგომარეობის შესახებ ამ ზონის ინფორმაციულობა არის მცირე. 700ჰც-ზე მაღალსიხშირული რხევები ძლიერად ქრებიან ზეთში. დიაგნოსტიკისათვის სასარგებლო ინფორმაცია ამ ზონაში ისევე, როგორც დაბალ სიხშირულში პრაქტიკულად არ არის.

თეორიულად კარგ მდგომარეობაში მყოფი ტრანსფორმატორის ავზის ზედაპირზე დარეგისტრირებული იდეალური ვიბროსიგნალის სპექტრი უნდა შედგებოდეს მხოლოდ სამი სპექტრალური პიკისაგან. პირველი პიკი 100ჰც სიხშირით, ყოველთვის არსებობს და ელექტრომაგნიტური ძალის მოქმედების შედეგია. იგი გამოწვეულია მაგნიტოსტრიქციის ეფექტით

მაგნიტოგამტარში და ელექტროდინამიკური პროცესებით გრაგნილში და ქსელის გაორმაგებული სიხშირის პროპორციულია. სხვა ორი გვევლინება ძირითადი სიგნალების მესამე და მეხუთე ჰარმონიკად და გააჩნიათ 300 და 500ჰც სიხშირეები. ისინი სპექტრში გამოჩნდებიან ტრანსფორმატორის ფერომაგნიტური გულარის გაჯერების გავლენის შედეგად. ტრანსფორმატორს, რომელსაც აქტიური ნაწილები დაწნეხილი აქვს იდეალურად, სხვა ჰარმონიკა არ შეიძლება ჰქონდეს.

რეალურ ტრანსფორმატორს ვიბრაციის სპექტრზე სრულებით სხვა სურათი აქვს. ჩვეულებრივ ადგილი აქვს ჰარმონიკებს შვიდამდე (700ჰც) სიხშირულ დიაპაზონში და ამ ჰარმონიკების ამპლიტუდების თანაფარდობა არ ექვემდებარება სისტემატიზაციას. ერთნაირი ტრანსფორმატორისათვის ძნელია მოიძებნოს თუნდაც ორი წერტილი ერთი და იგივე სპექტრალური სურათით. აქ გამოვლინდება ტრანსფორმატორებს შორის სხვაობა, გაზომვის ადგილებში ავზის კორპუსის სხვადასხვა სიმტკიცე, დაბალი და მაღალი ძაბვის მხარეებს შორის სხვაობა, გულარის შიგა და გარე ფაზების სხვაობა.

სპექტრული ვიბროდიაგნოსტიკა ტარდება მოწყობილობის მუშაობის ორ რეჟიმში: უქმი სვლის და დატვირთვის რეჟიმებში. დატვირთვის გარეშე მუშაობის დროს ელექტროდინამიკური ძალვა გრაგნილში პრაქტიკულად არ არის და ეს რეჟიმი ახასიათებს მხოლოდ გულარის მდგომარეობას. დატვირთვის ქვეშ გაზომვები მოიცავენ, როგორც გულარის, ისე გრაგნილის ვიბრაციებს. გრაგნილის ვიბრაციის სპექტრი მიიღება იმ შედეგების გამოკვლევის მიხედვით, რომელიც მიღებულია დატვირთვის გარეშე გაზომვებისა და დატვირთვის ქვეშ მიმდინარე ცდების შედეგების მიხედვით. ვიბრაციული სპექტრის მოცემული ანალიზის მიხედვით, რომელიც მიღებულია ფურიეს სწრაფი გარდაქმნის დახმარებით, განისაზღვრება გულარისა და გრაგნილის დაწნეხვის კოეფიციენტი, კონსტრუქციის ელემენტების მდგომარეობის კოეფიციენტი და განზოგადოებული კოეფიციენტი ტრანსფორმატორის მდგომარეობის

შესახებ. დაწნეხვის კიდევ ერთ პარამეტრს წარმოადგენს გაუარესების მდგომარეობის სიჩქარე ერთი თვის განმავლობაში. [11].

სიხშირული მეთოდის კონტროლის მეთოდიკა ემყარება ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის სიხშირული მახასიათებლის განსაზღვრას მისი ვიბრაციული რეაქციით არც თუ ისე დიდ 3-5კჰც იმპულსურ მექანიკურ ზემოქმედებაზე. იმპულსურ მექანიკურ ზემოქმედება ხორციელდება ტრანსფორმატორის კორპუსის მეტად ხისტ ნაწილზე და გამორიცხავს კონსტრუქციის ნებისმიერი სახის დაზიანებას. დაწნეხვის სიძლიერის განსაზღვრა წარმოებს გრაგნილის დაწნეხვის მექანიკური სისტემის რხევის სიხშირის ცვლილებით. დაწნეხვის სიძლიერის შემცირების დროს ხდება სპექტრალური სიმჭიდროვის გადანაცვლება

დაწნეხვის სიხშირის სიძლიერის შემცირების დროს ხდება სპექტრალური სიმკვრივის სიხშირის გადანაცვლება დაბალი სიხშირის მიდამოში, ხოლო დაწნეხვის სიძლიერის გადიდების დროს-გადაწევა მეტად მაღალი სიხშირის მიდამოში.

გულარის დაწნეხვითი სისტემის რხევები ფასდება ძაბვის პროცესების დროებითი რეალიზაციის გაზომვების საფუძველზე. რომელიც აღიძვრება გრაგნილში იმპულსურ მექანიკური ზემოქმედების დროს. ძაბვის გაჩენა ტრანსფორმატორის შესასვლელზე გამოწვეულია აქტიური ნაწილის ნარჩენი მაგნიტიზმის მაგნიტური ველის დამაბულობის გრადიენტის ცვლილებით, როცა აქტიურ ნაწილში ვრცელდება იმპულსური მექანიკური ზემოქმედებით გამოწვეული მექანიკური ძაბვის ტალღები. ხშირად ასეთ ფიზიკურ მოვლენებს უწოდებენ პიეზომაგნეტიზმს. გრაგნილებში აღძრული ძაბვის სპექტრალური შემადგენლობა ახასიათებს ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის რხევის სპექტრული შემადგენლობას [12,11].

1.2.6. თბოვიზორული გამოკვლევის მეთოდი

ამჟამად ბევრ ენერგოსისტემაში დიაგნოსტიკისათვის გამოიყენება ინფრაწითელი ტექნიკის მოწყობილობები-თბოვიზორები. ტრანსფორმატორების კომპლექტური გამოკვლევისათვის ჩატარებულმა ცდებმა გვიჩვენა, რომ თბოვიზორული კონტროლის მეშვეობით შესაძლებელი გახდა გამოვლენილიყო ძალურ ტრანსფორმატორებში შემდეგი გაუმართაობები:

1) მაგნიტოგამტარის ცალკეული ელემენტის იზოლაციის დარღვევის გამო ფანტვის მაგნიტური ველების აღძვრა. მუშაობის დროს გაგრილების სისტემის დარღვევა.

2) გაციების სისტემის მუშაობის დაღვევა.

3) ტრანსფორმატორის ავზში ზეთის ცირკულაციის ცვლილება-შლამის ჩაწვეთების გამო შეგუბებული ზონების გაჩენა, გრაგნილის იზოლაციის გაჯირჯვება ან წანაცვლება.

4) გრაგნილის შიდა კონტაქტური შეერთებების გახურება ტრანსფორმატორის გამომყვანებით.

5) ჩაშენებული დენის ტრანსფორმატორის გრაგნილებში ხვიათა მოკლედ შერთვა.

6) საკონტაქტო სისტემის გაუარესება.

რადგანაც თბოვიზორის საშუალებით ტრანსფორმატორის შინაგანი მდგომარეობის შეფასება ხდება ავზის ზედაპირზე ტემპერატურული გრადიენტის გაზომვის გზით, ამიტომ აუცილებელია მხედველობაში მივიღოთ გრაგნილისა და მაგნიტოგამტარის სითბოგადაცემის მახასიათებლები [12].

1.2.7. დენის გაზომვის მეთოდი და უქმი სვლის დანაკარგი

უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვის მეთოდი დაბალი ძაბვის დროს შეიმუშავა და შემოგვთავაზა აშრიატოვმა. დაბალი ძაბვების დროს უქმი სვლის დანაკარგს, ტრანსფორმატორებისათვის, რომელთა სიმძლავრე 10მგვტ და უფრო მეტია ზომავენ ტრანსფორმატორის აწყობის პროცესში ოპერატიული გამოცდებისას ხვებს შორის მოკლე შერთვის თავიდან აცილების მიზნით და აგრეთვე იმისათვის, რომ აღმოჩენილი იქნას ხვების არათანაბარი რაოდენობა პარალელურად შეერთებულ კოჭებზე (შტოებზე), არასწორად შეერთებული გრაგნილები ან გადართვის მოწყობილობები და სხვა სახის დეფექტები.

მიღება-ჩაბარების გამოცდის პროცესში, როდესაც ტრანსფორმატორმა გაიარა ტექნოლოგიური სამუშაოების ყველა სტადია და მისი აქტიური ნაწილი იმყოფება ზეთით სავსე ავზში, მცირე ძაბვის დანაკარგის გაზომვა შესაძლო დეფექტების აღმოჩენის გარეშე, რომელიც არ გამოვლინდა აწყობის პროცესში (რაც ხდება იშვიათად) იძლევა დანაკარგის მნიშვნელობას მოცემულთან შესადარებლად, მონაცემები გამოიყენება ტრანსფორმატორების გამოცდისას ექსპლოატაციაში შეყვანის წინ ან რემონტის შემდეგ.

დენისა და უქმი სვლის დანაკარგების გაზომვისას ვლინდება ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის შესაძლო დეფექტები, რომელიც აუცილებელია ხანგრძლივად მომუშავე ტრანსფორმატორის შემდგომი ექსპლოატაციის შესაძლებლობისათვის. ყველა დეფექტი, რომელიც დაკავშირებულია ძირითადი მაგნიტური ნაკადის ან მისი ნაწილის გარშემო დენგამტარი ჩაკეტილი კონტურის წარმოქმნასთან, იწვევენ უქმი სვლის დანაკარგებს. დამაგნიტების დენის გაზომვით შეიძლება ასევე გამოვლენილი იქნას გრაგნილების წანაცვლება მოკლე შერთვის შემდგომ [13].

რემონტის შემდეგ ექსპლუატაციაში ისევ შეყვანილი ტრ-ებისათვის უქმი სვლის დანაკარგების გაზომილი მნიშვნელობა ქარხნულ მონაცემებთან შედარებით არ უნდა განსხვავდებოდეს 5%-ზე მეტად. ექსპლოატაციის პროცესში კომპლექსური გამოცდისას განსხვავება დანაკარგის გაზომილ მნიშვნელობასა და საწყის მონაცემებს შორის არ უნდა გადააჭარბოს 30%-ს.

1.3 უქმი სვლის დანაკარგები გაზომვის მეთოდის თავისებურებანი დაბალი ძაბვების დროს

განხილული მეთოდები იძლევიან საშუალებას განვსაზღვროთ გრაგნილის დეფორმაციები, გრაგნილისა და მაგნიტოგამტარის დაწნეხვის ხარისხი, დენგამტარი ჩაკეტილი კონტურის წარმოქმნა.

ერთის მხრივ, აღნიშნული მეთოდი არ იძლევა საშუალებას გამოავლინოს ის ცვლილება, რომელიც გამოწვეულია ფურცლებს შორის იზოლაციის დარღვევით. მხოლოდ თბოვიზორული კონტროლისა და უქმი სვლის დანაკარგის მეთოდები იძლევიან საშუალებას გამოვლენილი იქნას ეს ცვლილებები ფურცლებშორისი იზოლაციის საკმაოდ დიდი ფართობის დაზიანების დარღვევისას.

ფურცლებშორის იზოლაციის მდგომარეობის კონტროლი დაკავშირებულია სპეციალურ გამოცდებთან, რომლებიც გაზომვების ჩატარებისათვის მოითხოვენ ავზის გახსნასა და ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ამოღებას:

1. უქმი სვლის დანაკარგების განსაზღვრა გრაგნილის დახვევის კონტროლისას, რომელიც აუცილებელია ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარში მუშა ინდუქციის დონის შესაქმნელად;

2. უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვა მაგნიტოგამტარის განაპირა ფურცლების მოკლედ შერთვისას მის გარე ზედაპირთან.

3. ძაბვის გაზომვა მაგნიტოგამტარის განაპირა ფურცლებსა შორის და პაკეტებს შორის შიგა და გარე ზედაპირებზე.

4. ძაბვის გაზომვა პაკეტების მიხედვით (ჩამოკლებულ ფურცლებიანი პაკეტების აღმოსაჩენად);

5. ცალკეული პაკეტებისათვის ამპერმეტრისა და ვოლტმეტრის მეთოდებით. მუდმივი დენის კუთრი წინაღობის გაზომვა.

ტრანსფორმატორის ავზის გახსნა და დროის მნიშვნელოვანი დანაკარგები მითითებული შემოწმების ჩატარებაზე მიუთითებს განსაზღვრული პრობლემების არსებობაზე, რომელიც დაკავშირებულია არა მხოლოდ მაგნიტური სისტემის მუშა უნარიანობის კონტროლთან, არამედ ტრანსფორმატორების ექსპლოატაციის პროცესში დანაკარგების ზრდის თავიდან აცილებასთან.

დანაკარგებს დაბალი ძაბვების დროს ზომავენ საწარმოო დამამზადებლები 50ჰც სიხშირის და ნომინალური ძაბვის არაუმეტეს 10% , ჩვეულებრივ 220 /380ვ ძაბვის დროს. სამფაზიანი ტრანსფორმატორისათვის დანაკარგებს ზომავენ ერთფაზა აღზნების დროს, იმისათვის რომ იცოდნენ დანაკარგები ცალკე თითოეული ფაზისათვის, რათა გვექონდეს შესაძლებლობა შევადაროთ ისინი და დავრწმუნდეთ, რომ ტრანსფორმატორს აქვს ფაზების მიხედვით დანაკარგების სწორი თანაფარდობა და არ გააჩნია დეფექტები.

ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის მხრიდან კვების დროს აწარმოებენ სამ ცდას შემდეგი თანმიმდევრობით:

პირველი ცდა-ახდენენ გრაგნილის a ფაზის მოკლე შერთვას, კვებას მიაწვდიან ტრანსფორმატორის b და c ფაზების გრაგნილებს და ზომავენ დანაკარგს P'_{0bc} ;

მეორე ცდა-მოკლედ შერთავენ გრაგნილის b ფაზას, კვებას მიაწვდიან ტრანსფორმატორის a და c ფაზების გრაგნილებს და ზომავენ დანაკარგს P'_{0ac} ;

მესამე ცდა-მოკლედ შერთავენ გრაგნილის c ფაზას, კვებას მიაწვდიან ტრანსფორმატორის a და b ფაზების გრაგნილებს და ზომავენ დანაკარგს P'_{0ab} :

ფაზების მიხედვით გაზომილ დანაკარგებს ადარებენ ერთმანეთს. დეფექტების არსებობის შემთხვევაში ტრანსფორმატორში დანაკარგები P'_{0bc} და P'_{0ab} უნდა იყოს პრაქტიკულად (5%) და ერთმანეთის ტოლი, ხოლო დანაკარგი P'_{0ac} უნდა იყოს დაახლოებით 20-50%-ით მეტი P'_{0bc} და P'_{0ab} .

მოცემული მეთოდის ერთ-ერთ ნაკლს წარმოადგენს უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვის შედეგების დამოკიდებულება ტრანსფორმატორის გულარის ნარჩენი დამაგნიტების სიდიდეზე, რომელიც თავს იჩენს ტრანსფორმატორის უეცარი გამორთვისა და დენის შეწყვეტის შედეგად. დამაგნიტების სიდიდე წარმოადგენს შემთხვევით სიდიდეს და დამოკიდებულია მხოლოდ დენის ფაზაზე ტრანსფორმატორის გამორთვის მომენტზე.

მაშასადამე, უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვით შეუძლებელია ერთმნიშვნელოვნად განსაზღვრო წარმოადგენს თუ არა მნიშვნელობათა გაფანტვა ნარჩენი დამაგნიტებისა ან განვითარებადი დეფექტის შედეგს. მითუმეტეს შეუძლებელია ასეთი ხასიათის დეფექტის პროგნოზირება, ამიტომ დანაკარგის საიმედო შედეგის მისაღებად დაიწყეს ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარის განმაგნიტება. მაგნიტური სისტემის ერთმნიშვნელოვნად განსაზღვრულ მდგომარეობაში გადასაყვანად შესაძლებელია შემდეგი მეთოდიდან ერთ-ერთით:

1. ფერომაგნიტური გულარის გათბობა კიურის ტემპერატურამდე.
2. ურთიერთსაწინააღმდეგო პოლარობის მუდმივი დენის ციკლური გაშვება ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარის თითოეული ღეროს გრაგნილში.

განმაგნიტების პროცესი ხორციელდება რამდენიმე ციკლად. პირველ ციკლში განმაგნიტების დენი უნდა იყოს ტრანსფორმატორის უქმი სვლის

გაორმაგებულ დენზე არა ნაკლები ნომინალური ძაბვის დროს. ყოველ მომდევნო ციკლში განმაგნიტების დენი 30%-ით ნაკლები უნდა იყოს წინამორბედ დენზე. უკანასკნელ ციკლში განმაგნიტების დენი არ უნდა იყოს მეტი ტრანსფორმატორს უქმი სვლის დენზე.

პირველ მეთოდს არ გააჩნია პრაქტიკული ღირებულება, რადგან კიურის ტემპერატურა ელექტროტექნიკური რკინისათვის შეადგენს 769%.

მეორე მეთოდი საკმაოდ ეფექტურია, მაგრამ არ იძლევა ყველა ღეროს ნულოვანი ინდუქციის მდგომარეობაში ცალსახა ერთდოულად გადაყვანის გარანტიას, რომელიც დაკავშირებულია ნარჩენი დამაგნიტების სიდიდის გაზომვის შესაძლებლობის უქონლობასთან.

უქმი სვლის დანაკარგის მეთოდის სხვა ნაკლს წარმოადგენს ერთი გაზომილი დიაგნოსტიკური პარამეტრი, რომლის მიხედვითაც შეუძლებელია დეფექტის ხასიათის კლასიფიკაცია. ამიტომ მისი მგრძობიარობისა და ინფორმატიულობის ამაღლება საშუალებას იძლევა გაფართოვდეს უქმი სვლის დანაკარგის შესაძლებლობები.

1.4 დანაკარგების ძირითადი სახეები ტრანსფორმატორებში

ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დანაკარგის აქტიური სიმძლავრე წარმოადგენს გულარას ფოლადში, გრაფილების სპილენძსა და უქმი სვლის დამატებითი დანაკარგების ჯამს.

დამატებით დანაკარგების მთავარ სახეებად გვევლინებიან დანაკარგები ფოლადის ფურცლებში, მათი მექანიკური დამუშავების შედეგად, რაც იწვევს ფურცლების სტრუქტურის ცვლილებას. აგრეთვე პირაპირებისა და სარჭეების განლაგების ადგილებში, სადაც ხდება მაგნიტური ინდუქციის არათანაბარი განაწილება, დანაკარგები კონსტრუქციულ დეტალებსა მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორების იზოლატორებში. უქმი სვლის დამატებითი დანაკარგები არ ექვემდებარება

ზუსტ გათვლას და შეადგენს ძირითადი დანაკარგის 15-20% ფოლადის გულარში [14].

სპილენძის გრაგნილში დანაკარგის სიდიდე ჩვეულებრივ შეადგენს 2%-ზე ნაკლებს უქმი სვლის დანაკარგების ჯამთან შედარებით, ეს იმას ნიშნავს, რომ უქმი სვლის სიმძლავრე პრაქტიკულად იხარჯება დანაკარგებზე ფოლადში.

ძირითადი დანაკარგები ფოლადის გულარში დამოკიდებულია ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარში ფერომაგნიტური მასალების თვისებებზე. ფერომაგნიტური მასალების თვისებების დასახასიათებლად შემოღებულია დამაგნიტების მრუდი. დამაგნიტების მრუდის მიხედვით იგებენ ცალსახა დამოკიდებულებას მაგნიტური ინდუქციის B ვექტორსა და მაგნიტური ველის H დამაბულობას შორის. დამაგნიტების მრუდის ხასიათი $B = f(H)$ ძალიან რთულია და დამოკიდებულია როგორც რკინაში ქიმიური ელემენტების მინარევებზე, ასევე მასალის მექანიკურ და თერმულ დამუშავებაზე. ძალიან სუსტი ველების დროს მრუდს $B = f(H)$ გააჩნია თითქმის წრფივი მახასიათებელი შემდეგ მრუდი იღუნება და გადადის მაქსიმალური მაგნიტური შეღწევადობის არეალში, რომელსაც უწოდებენ "მუხლს". მუხლის შემდეგ მრუდი გადადის წრფეში, რომელსაც გააჩნია რამდენიმე დახრა აბსცისათა ღერძთან. მრუდის ეს უბანი ხასიათდება მაგნიტური მასალის გაჯერების უბნით, სადაც დამაგნიტების საზღვრებში ინდუქცია აღწევს ნაჯერობის სიდიდეს და შემდეგ რჩება მუდმივი. ინდუქციის შემდგომი ზრდა მიმდინარეობს მხოლოდ კოჭის აღზნების დენის ხარჯზე. რაც იწვევს უცვლელ გადახრას მრუდისა $B = f(H)$ აბსცისათა ღერძთან.

ფერომაგნიტური მასალებისათვის ნიშანდობლივია ჰისტერეზისის მოვლენა, მაგნიტური ინდუქციის ცვლილების ჩამორჩენა მაგნიტური ველის H დამაბულობის ცვლილებისაგან. ველის დამაბულობის პერიოდული ცვლილების დროს დამოკიდებულება B და H შორის იღებს

მარყუჯის ხასიათს. განასხვავებენ ჰისტერეზისული მარყუჯის რამდენიმე ტიპს: სიმეტრიულს, ზღვრულს, არასიმეტრიულს.

თითოეული სიმეტრიული მარყუჯისათვის ინდუქციის მაქსიმალური დადებითი მნიშვნელობა B მაქსიმალური უარყოფითი მნიშვნელობის $-B$ მოდულის ტოლია და შესაბამისად $H_{max} = |-H_{max}|$. სიმეტრიული ჰისტერეზისული მარყუჯების გეომეტრიული წვეროები დევს დამაგნიტების ძირითად მრუდზე.

მაგნიტური ველის H_{max} დამაბულობის ძალიან დიდი მნიშვნელობის დროს მიიღწევა ჰისტერეზისის ზღვრული მარყუჯი, მარყუჯის გადიდებისას ჰისტერეზისი შეწყდება. ჰისტერეზისის ზღვრული მარყუჯი შეიძლება დახასიათდეს ნარჩენი ინდუქციით B_k , რომელიც შეინახება მასალაში ველის მოხსნის შემდეგ და კოერციტიული ძალით H_c , რომელიც სიდიდით ტოლია ველის დამაბულობისა და აუცილებელია მასალის განმაგნიტებისათვის.

ჰისტერეზისის ყველა მარყუჯს გარდა ზღვრულისა, მიღებულია ეწოდოს კერძო მარყუჯები. ჰისტერეზისის სიმეტრიული კერძო მარყუჯის ახლოს საინტერესოდ გვევლინება არასიმეტრიული კერძო მარყუჯები, რომლებიც მიიღებიან არასიმეტრიული დენებით დამაგნიტების დროს. ასეთ შემთხვევაში დამოკიდებულებას B და H შორის ექნება მარყუჯის სახე, მაგრამ მარყუჯის ცენტრი არ დაემთხვევა საწყის კორდინატს.

ფერომაგნიტური მასალის პერიოდული გადამაგნიტების დროს მასში ხორციელდება შეუქცევადი პროცესები, რომლებზეც დამაგნიტებელი წყაროდან იხარჯება ენერგია. ზოგადად ფერომაგნიტურ გულარში დანაკარგი განპირობებულია ჰისტერეზისით და მაკროსკოპული გრიგალური დენებით. სხვადასხვა სახის დანაკარგის გამოვლენის ხარისხი დამოკიდებულია ფერომაგნიტური მასალის გადამაგნიტების სიჩქარეზე. როცა გულარა გადამაგნიტდება დროში შენელებულად, მაშინ დანაკარგი განპირობებულია პრაქტიკულად ჰისტერეზისით. პერიოდული გადამაგნიტება მიმდინარეობს ჰისტერეზისის დინამიური მარყუჯებით,

რომელიც ჰისტერეზისის სტატიკურ მარყუჟებთან შედარებით უფრო ფართოა გრიგალური დენების დანაკარგებისაგან გამოწვეული არსებითი წვლილის გამო [15].

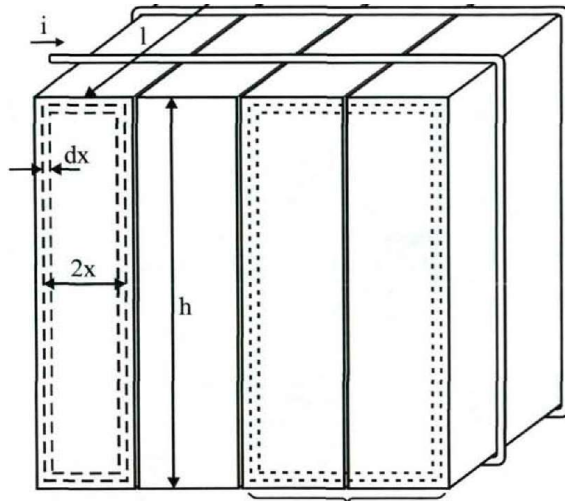
ჰისტერეზის უზისით განპირობებული დანაკარგი ფიზიკურად გამოწვეულია გადამაგნიტების ჩანასახის ზრდის პროცესის ინერციულობით, აგრეთვე დამაგნიტების ვექტორის ბრუნვის პროცესების შეუქცევადობით. ჰისტერეზისული მარყუჟის ფართობები ახასიათებს ენერგიას, რომელიც გამოიყოფა ფერომაგნიტური ნივთიერების მოცულობაში ერთეულ გადამაგნიტების ერთი ციკლის განმავლობაში [16].

მაშასადამე, უქმი სვლის დანაკარგების ძირითად წილს მოიცავს დანაკარგები ფოლადის მაგნიტოგამტარში, რომელიც შედგება დანაკარგებისაგან ჰისტერეზისზე და გრიგალურ დენებზე. თავის მხრივ, დანაკარგის სიდიდე დამოკიდებულია მასალის თვისებებზე და მაგნიტური სადენის გეომეტრიულ პარამეტრებზე. ტრანსფორმატორის გულარის გეომეტრიული ზომები იცვლება მოკლედშერთული კონტურების წარმოქმნისას აქტიურ ფოლადში, დაწნევის ხარისხის ცვლილებისას აქტიური ფოლადის პაკეტში, ფოლადის პაკეტის ფურცლებშორისი იზოლაციის დარღვევის დროს და შეპირაპირების ადგილებში ნაპრალების გადიდებისას.

1.5 დანაკარგი მაგნიტოგამტარში ფოლადის ფირფიტის იზოლაციის დაზიანების დროს

მაგნიტოგამტარში ფირფიტის იზოლაციის დარღვევა იწვევს დანაკარგის გაზრდას გრიგალურ დენებზე. მიახლოებით შევაფასოთ მაგნიტური გამტარის პაკეტში დანაკარგის ცვლილების დამოკიდებულება დარღვეული იზოლაციანი ფირფიტის რაოდენობაზე. ნახ. 1.6.-ზე გამარტივებული სახით ნაჩვენებია მაგნიტური გამტარის ნაწილი მასზე დახვეული ხვიებით. ელემენტარული გრიგალური დენი ცირკულირებს

ფენაში d_x სიდიდით, კონტური, რომლის ირგვლივ ცირკულირებს ელემენტარული გრიგალური დენი, ნაჩვენებია პუნქტირით.



ნახ. 1.6. ფირფიტებად დაყოფილი მაგნიტოგამტარის ნაწილი

ფურცლებში დახარჯული სიმძლავრე განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$p_B = \frac{\pi^2}{6\rho} h l \alpha^3 f^2 B_m^2$$

ელექტროტექნიკური ფოლადის n ფურცლებისაგან შედგენილ პაკეტებში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგი გრიგალურ დენებზე განისაზღვრება ფორმულით:

$$p_B = n \frac{\pi^2}{6\rho} h l \alpha^3 f^2 B_m^2$$

სადაც h - პაკეტის სიმაღლე

l – პაკეტის სიგრძე

α -ფოლადის ფურცლის სისქე

f – ცვლადი დენის სიხშირე

B_m - ინდუქციის მაქსიმალური მნიშვნელობა პაკეტში

ρ - ელ. ტექნიკური ფოლადის კუთრი წინაღობა

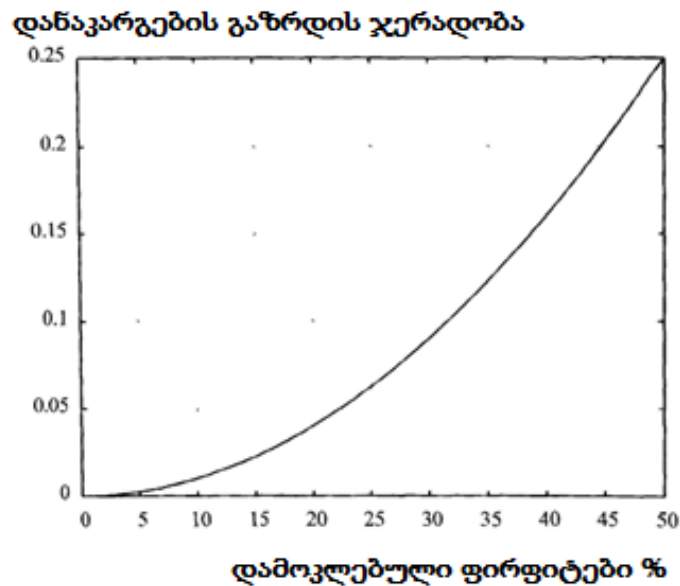
საიზოლაციო ზედაპირის დარღვევის შემთხვევაში პაკეტის ფურცლის მთელი სიგრძის 1%-ზე მაგნიტოგამტარის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გრიგალურ დენზე შეადგენს:

$$P_{Bk} = 0.01 \frac{((n - k)\alpha^3 + (kn)^3)\pi^2}{6pk} hlf^2 B_m^2$$

დანაკარგის გაზრდის ჯერადობა:

$$\frac{P_{Bk}}{P_B} = 0.01 \left(1 + \frac{k-1}{n}\right)$$

ნახ. 1.7.-ზე წარმოდგენილია დანაკარგის ზრდის დამოკიდებულება დაზიანებულ ფირფიტაზე მაგნიტოგამტარის ნაწილისათვის, რომელიც წარმოადგენს მაგნიტოგამტარის მთელი სიგრძის 1%-ს, ამ დამოკიდებულებიდან ჩანს, რომ ფურცლებს შორის იზოლაციის დარღვევის დროს განხილული უბნის ფირფიტების 20%-ს დანაკარგი ეზრდება 4%-ით.



ნახ.1.7. აქტიური დანაკარგების ზრდის დამოკიდებულება დამოკლებული ფირფიტების წილზე

ელექტრომოწყობილობების გამოცდების მოცულობისა და ნორმების მიხედვით დაშვებულია გაზომილი დანაკარგის გადახრა უქმი სვლის დანაკარგებიდან 5%-ის ფარგლებში. ე.ი ზემოთ ნახსენები ფურცლებს შორის იზოლაციის 20%-იანი დარღვევა არ დიაგნოსტირდება. 5%-ზე ნაკლები დიაგნოსტიკური ზღვარის დადგენა ნარჩენი მაგნეტიზმის მოვლენის გამო შეუძლებელი ხდება, რადგან იგი იწვევს უქმი სვლის დანაკარგის დიდი რაოდენობით გაფანტვას.

შედეგები და მათი განსჯა

თავი II. დეფექტების გავლენა გაზომილი პარამეტრების სიდიდეებზე და მათი ინფორმატიულობის ამაღლება

2.1. ელექტრომაგნიტური არაერთგვაროვნება მაგნიტოგამტარის სხეულში

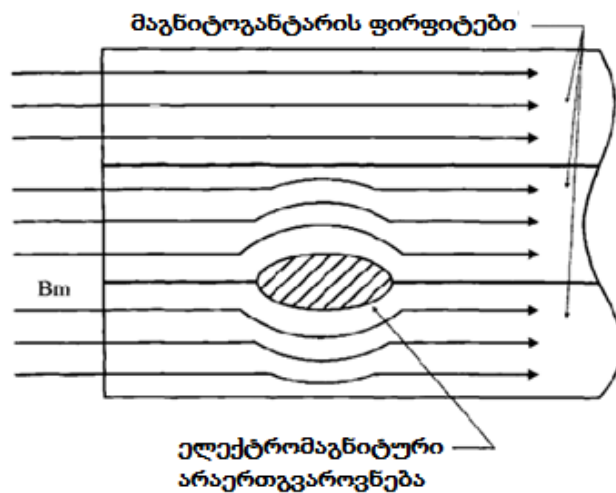
მაგნიტოგამტარის ელექტროტექნიკური ფოლადის ფირფიტების იზოლაციის დარღვევა იწვევს, გამტარის ელექტრომაგნიტური მახასიათებლების ლოკალურ ცვლილებებს და ე.წ. "ელექტრომაგნიტური ლინზების" განვითარებას.

გრიგალური დენებით გამოწვეული სითბური დანაკარგები იწვევენ "ელექტრომაგნიტური ლინზების" შიგა მოცულობის გათბობას და ელექტროსტატიკური ფოლადის კუთრი წინაღობის გაზრდას. ტემპერატურის გაზრდით, გრიგალური კონტურის წინაღობა იზრდება, რაც იწვევს გრიგალური დენის შემცირებას და ამ დენებით გამოწვეულ სითბურ დანაკარგებს. "ელექტრომაგნიტური ლინზის" ტემპერატურა იწყებს დაცემას და შესაბამისად მცირდება მაგნიტური კონტურის წინაღობა, რასაც მიყვავართ გრიგალური დენის გაზრდასთან და თვითდარეგულირების პროცესი მეორდება.

მაშასადამე, თვითდარეგულირების მექანიზმის წყალობით "ელექტრომაგნიტური ლინზის" სივრცეში მყარდება რაღაც ტემპერატურა და პროცესი სტაბილიზირდება განუსაზღვრელი დროით. ტემპერატურის მომატებას მიყვავართ საიზოლაციო ზედაპირის დარღვევასთან, ფოლადის ფურცელში "ელექტრომაგნიტური ლინზის" საზღვრებზე, რაც თავისთავად იწვევს მისი მოცულობის გაზრდას.

გრიგალური დენების ცირკულაცია "ელექტრომაგნიტური ლინზის" მოცულობაში ქმნის მაგნიტურ ველს, რომელიც მიმართულია ძირითადი ნაკადის საწინააღმდეგოდ და იწვევს ძირითადი მაგნიტური ნაკადის განდევნას მაგნიტოგამტარის ბოლოებისკენ (ნახ. 2.1). მაგნიტური ნაკადის

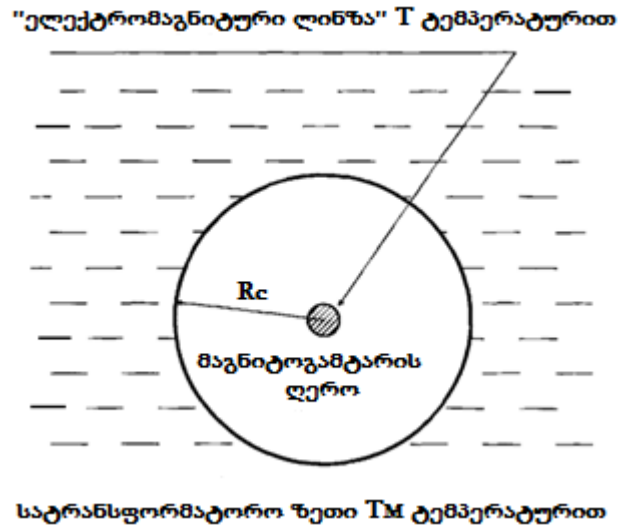
განდევნა თავის მხრივ იწვევს, დანაკარგის გაზრდას ჰისტერეზისზე, მაგნიტური სადენის დაუზიანებელ უბნებში, რასაც მივყავართ უკვე დამყარებული სითბური ბალანსის დარღვევასთან. შემდგომში მიმდინარეობს ტემპერატურის ზვავისებური მომატება კიურის წერტილების ტემპერატურამდე (769°C), როდესაც ელექტროტექნიკური ფოლადი კარგავს ფერომაგნიტურ თვისებებს და ხდება პარამაგნეტიკი. საბოლოოდ, "ელექტრომაგნიტური ლინზების" სივრცეში ქრება მაგნიტური დანაკარგები და პროცესი შეიძლება დასტაბილურდეს კიურის წერტილების ტემპერატურის ფარგლებში.



ნახ. 2.1. მაგნიტური ინდუქციის ხაზები მაგნიტოგამტარში

გულარის სივრცეში ტემპერატურის მომატებას 700°C -მდე, თან ახლავს გაზის გამოყოფა – სატრანსფორმატორო ზეთის დაშლის კვალდაკვალ, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ტრანსფორმატორის გაზური დაცვის მწყობრიდან გამოყვანა. გარდა ამისა, ფერომაგნიტური თვისებების მქონე მაგნიტური გამტარის მოცულობის ნაწილის დაკარგვამ შეიძლება მიგვიყვანოს მაგნიტურ გამტარში სასარგებლო კვეთის შემცირებამდე, ინდუქციის გაზრდასა და მისი "ჯანმრთელი უბნის" გახურებამდე, მით უფრო, რომ პროვოცირებას უკეთებს მაგნიტური სადენის ყველა კვეთის შემდგომ

დაზიანებას. დასადგენი ტემპერატურა ფოლადის შიდა მოცულობაში დარღვეული ფურცლებს შორის იზოლაციის დროს განისაზღვრება სიმპლავრის ბალანსით. რომელიც განზნუნულია მაგნიტური სადენის გულარის ზედაპირზე გარემომცველ ზეთოვან სივრცეში .



ნახ. 2.2. მაგნიტოგამტარის ღეროში ტემპერატურული რეჟიმის გასაანგარიშებელი სქემა "ელექტრომაგნიტური ლინზის" წარმოქმნის დროს

განვიხილოთ მაგნიტოგამტარის ცილინდრული ღერო, რომელიც წარმოდგენილია ნახ.2.2-ზე. გულარის რადიუსია R_c . მაგნიტოგამტარი მოთავსებულია სატრანსფორმატორო ზეთში, რომლის მუდმივი ტემპერატურაა T_M , გულარის შიგნით არის ფურცლებს შორის იზოლაციით დარღვეული ადგილი "ელექტრომაგნიტური ლინზა" r რადიუსით. მაგნიტური ველის ინდუქცია მაგნიტოგამტარის გულარში $B=B_m \sin(\omega t)$. "ელექტრომაგნიტური ლინზის" ტემპერატურა T . ელემენტარული გრიგალური დენი ცირკულირებს $2\pi r$ სიგრძის კონტურის ირგვლივ dr სისქის ფენაში. კონტურის განივკვეთია $-ldr$.

ამ კონტურის აქტიური წინაღობა ტოლია:

$$R_k = \frac{2\pi\rho r}{ldr}$$

სადაც ρ ელექტროტექნიკური ფოლადის კუთრი წინაღობაა (ომ.მ), l - პაკეტის სიგრძე (მ).

ამ კონტურის ელექტრომაგნიტური ძალა ტოლი იქნება:

$$E = -\pi r \frac{dB}{dt} = -\pi^2 r^2 f B_m \cos(\omega t) = E_m \cos(\omega t),$$

$$\text{სადაც } E_m = 2\pi^2 r^2 f B_m$$

ელექტრომაგნიტური ძალის მოქმედი მნიშვნელობა:

$$E = \sqrt{2} \pi^2 r^2 f B_m$$

გრიგალური დენების მიერ გამოყოფილი სიმძლავრე ელემენტარულ dr ფენაში განისაზღვრება:

$$dP_6 = \frac{\pi^3 r^3 f^2 B_m^2 l dr}{\rho(1+\alpha(T-20))}, \quad (2.1)$$

სადაც f -ცვლადი დენის სიხშირე (ჰც),

L - "ელექტრომაგნიტური ლინზის" სიგრძე (მ),

ρ -ელექტრომექანიკური ფოლადის კუთრი წინაღობა 20°C -ზე (ომ.მ),

T - "ელექტრომაგნიტური ლინზის" ტემპერატურა ($^\circ\text{C}$),

α -ფოლადის წინაღობის ტემპერატურული კოეფიციენტი 20°C -ზე.

(2.1) გამოსახულების ინტეგრირებით მივიღებთ "ელექტრომაგნიტურ ლინზაში" გამოყოფილ სიმძლავრეს:

$$P_B = \frac{3\pi^3 r^4 f^2 B_m^2}{4\pi(1+\alpha(T-20))}, \quad (2.2)$$

გულარის ცილინდრული კედელის სისქის მიერ სითბოგადაცემა სითბოგადაცემის ძირითად კანონებთან შესაბამისობით განისაზღვრება გამოსახულებით :

$$dT = \frac{-P_B dr}{2\pi L \lambda r}, \quad (2.3)$$

სადაც dT -სხვაობა მაგნიტოგამტარის გულარის შიგა და გარე ზედაპირებს შორის,

λ -ფოლადის სითბოგამტარობის კოეფიციენტი ვტ/მ°C ,

P_B -სითბური ნაკადი, რომელიც გადის r რადიუს ლინზის ცილინდრულ ზედაპირზე.

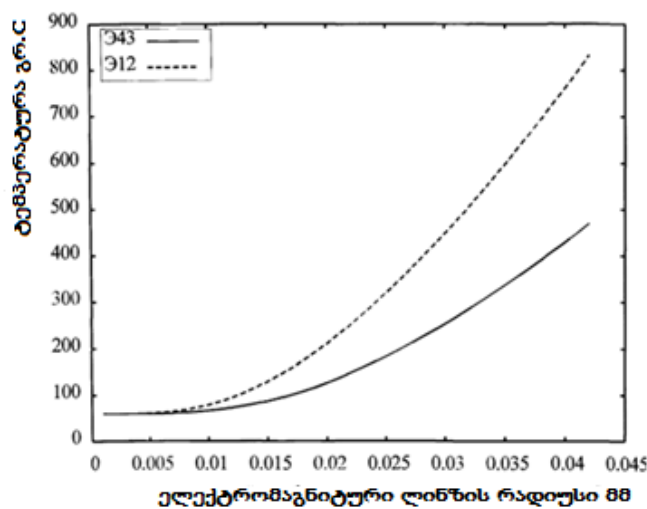
გულარის შიგა ზედაპირს აქვს უფრო მაღალი ტემპერატურა T , ვიდრე გარე T_m , ე.ი $T > T_m$, მაშინ (2.3) გამოსახულების ინტეგრირებით წევრ-წევრად შესაბამისი ზღვარის ფარგლებში მივიღებთ:

$$T - T_m = \frac{P_B \ln \left(\frac{R_C}{r} \right)}{2\pi\lambda L}, \quad (2.4)$$

ჩავთვლით რა T_m ზეთის ტემპერატურას ცნობილად, (2.2) და (2.4) ფორმულების დახმარებით მივიღებთ გამოსახულებას, რომელიც განსაზღვრავს ფურცლებშორისი იზოლაციის დარღვევისას მოცულობის შიდა ტემპერატურას:

$$T = -b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}, \quad \text{სადაც } b = 1 - \alpha(T_M + 20),$$

$$c = T_M(20\alpha - 1) - \frac{r^4 \ln \left(\frac{R_C}{r} \right) f^2 \pi^2 B_m^2}{8\lambda\rho}$$



ნახ.2.3. "ელექტრომაგნიტური ლინზის" ტემპერატურის დამოკიდებულება რადიუსზე $\ni 12, \ni 43$ მარკის ფოლადისათვის

ნახ.2.3-ზე წარმოდგენილია "ელექტრომაგნიტური ლინზის" ტემპერატურის $\exists 12, \exists 43$, მარკის ფოლადზე დამოკიდებულების მაგალითი, როცა ფოლადის მარკის პარამეტრებია: $B_m = 1,5$ ტლ, $R_c = 0.3$ მ, $T_M = 60^\circ\text{C}$, $f = 50$ ჰც, $\lambda=45,5$ ვტ/ $^\circ\text{C}$.

"ელექტრომაგნიტური ლინზის" უარყოფითი ზემოქმედება არ შემოიფარგლება მხოლოდ მაგნიტოგამტარის დაზიანებით, მას ახასიათებს დაჭუჭყიანება და სატრანსფორმატორო ზეთის თერმული დაშლა, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ხვიათა მოკლედ შერთვა ჯერ კიდევ ავარიის მოხდენამდე.

"ელექტრომაგნიტური ლინზის" გაჩენის დიაგნოსტიკა მის საწყის სტრადიაზე, უქმის სვლის დანაკარგის გაზომვით ძალიან რთულია, მაგნიტური გამტარის ნარჩენი მაგნეტიზმის შენიღბული მოქმედების გამო.

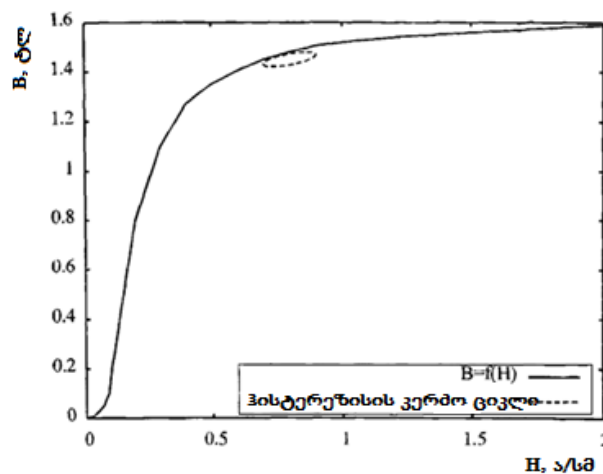
2.2. მაგნიტოგამტარის ხელოვნური დამაგნიტება

ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის სპეციფიურ თავისებურებად ითვლება ნარჩენი მაგნიტური ინდუქციის არსებობა, რომელიც ნარჩუნდება ფერომაგნიტიკაში ველის მოხსნის შემდეგაც. ეს აიხსნება ფერომაგნიტიკაში ისეთი ადგილების არსებობით, რომელიც გარე მაგნიტური ველის არსებობის დროს თვითნებურად მაგნიტდებიან. ამ არეების ადგილმდებარეობა და დამაგნიტებულობა სტატისტიკურად არ არის განსაზღვრული. ფერომაგნეტიკის თავისებურება არ იძლევა საშუალებას მოხდეს ცალმხრივად ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის იდენტიფიცირება. არაერთმნიშვნელოვანი მდგომარეობა ღრმავდება სამგულარიანი არასიმეტრიული მაგნიტური სისტემის არსებობით. საბოლოოდ, თითოეულს გულართაგან გააჩნია საკუთარი ნარჩენი ინდუქცია.

ნარჩენი მაგნიტიზმის გავლენის თავიდან ასაცილებლად, დიაგნოსტიკური მეთოდის მგრძნობიარობისა და არჩევითობის

ასამაღლებლად, კერძოდ უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვის მეთოდისთვის შემოთავაზებულია გაზომვები ჩატარდეს მაგნიტური გამტარის გარეშე წყაროდან მუდმივი დენით ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში. დამაგნიტებელი ველის H_0 მუდმივას დახმარებით შეიძლება დაფიქსირდეს სამუშაო წერტილი დამაგნიტების მრუდზე, დაედოს ცვლადი მაგნიტური ველი და გაიზომოს მაგნიტური ველის სიდიდე ჰისტერეზისის კერძო ციკლში.

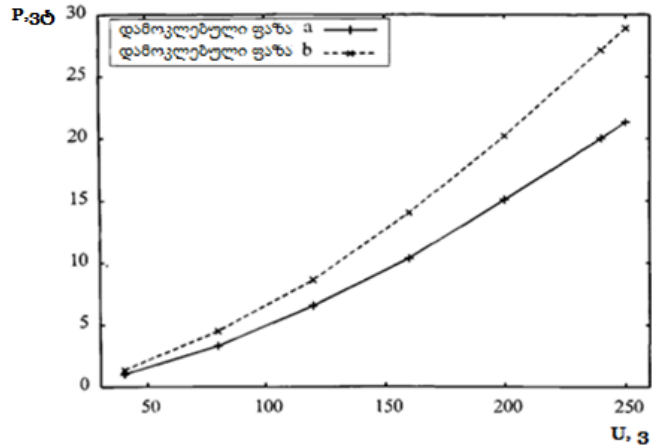
გავზრდით რა დამაგნიტების დენის სიდიდეს იმ მნიშვნელობამდე, რომელიც აჭარბებს უქმი სვლის დენს, შეიძლება გულარი გადავიყვანოთ გაჟღენთვის ანუ არასიმეტრილი დამაგნიტების რეჟიმში. გადამაგნიტება ცვლადი დენის დროს მიმდინარეობს დინამიური მარყუჭით, რომლის ფართობი პროპორციულია საერთო დანაკარგისა ფოლადში ერთი ციკლის განმავლობაში. დინამიური მარყუჭები განსხვავდება სტატიკური მარყუჭისაგან დიდი მრავალსახეობით, რადგან მათი სახე დამოკიდებულია არა მარტო მასალის მაგნიტურ თვისებებზე, არამედ გულარის გეომეტრიულ ზომებზე. დამაგნიტების მუდმივი დენის ვარიაცია საშუალებას იძლევა დიაგნოსტიკების სამუშაო წერტილი გადავიტანოთ დამაგნიტების მრუდის ნებისმიერ მიდამოში (ნახ. 2.4.).



ნახ. 2.4. ჰისტერეზისის კერძო ციკლი მუდმივი დენით დამაგნიტებისას
2.3. ტრანსფორმატორის ვოლტ-ვატური მახასიათებლები

ტრანსფორმატორის ვოლტ-ვატური მახასიათებელი წარმოადგენს სიმძლავრის აქტიური დანაკარგის დამოკიდებულების ტრანსფორმატორის გრაფიკზე გადაცემულ ძაბვასთან. ვოლტ-ვატური მახასიათებლები შეიძლება იქნას გადაღებული დაბალი ძაბვების დროს უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვის მომენტში. უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვა მიმდინარეობს სინუსოიდური ძაბვის დროს. ტრანსფორმატორის გრაფიკზე სინუსოიდური ძაბვის მოდების დროს, მაგნიტური ნაკადი იქნება აგრეთვე სინუსოიდური, მაშინ როცა გრაფიკის მაგნიტომამოძრავებელი ძალა და შესაბამისი დენი, დამაგნიტების ხარისხის შესაბამისად იქნება არა სინუსოიდური. დამაგნიტების დენი შეიცავს მაღალი, ძირითადად მესამე და მეხუთე რიგის ჰარმონიულ მდგენელებს.

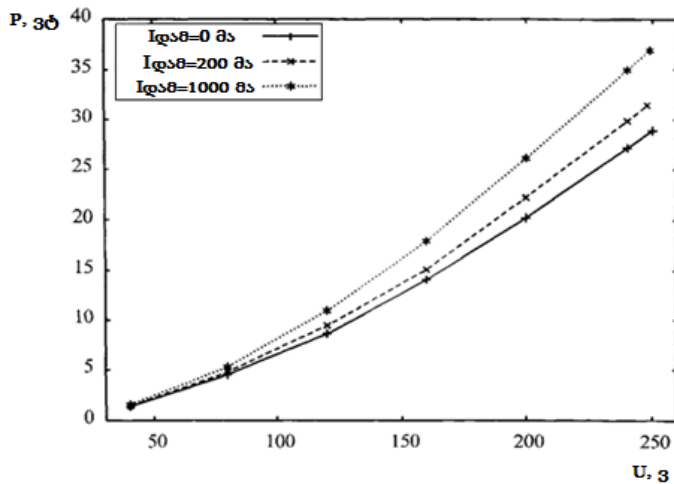
უქმი სვლის დენის აქტიური მდგენელი სინუსოიდური ძაბვის მოდების დროს არის სინუსოიდური. საერთო დამამაგნიტებელი დენი წარმოადგენს აქტიური სინუსოიდური და რეაქტიული არასინუსოიდალური მდგენელების ჯამს. ჩვეულებრივ, უქმი სვლის დენის გაზომვების დროს გრაფიკთან მოდებული ძაბვის სიდიდე შეადგენს ნომინალური ძაბვის 1-დან 10%-მდე, ანუ რაც იმას ნიშნავს რომ დამაგნიტების დენში მაღალი ჰარმონიკების შემადგენლობა არის უმნიშვნელო. მაშასადამე, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ უქმი სვლის დენის მაგნიტური დანაკარგების გაზომვა ხდება დამაგნიტების სინუსოიდალური დენის დროს. ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის ტიპური ვოლტ-ვატური მახასიათებელი დაბალი ძაბვის გრაფიკის აღზნების მხრიდან წარმოდგენილია 2.5. ნახაზზე.



ნახ.2.5. ТДН -25000/110 ტრანსფორმატორის ვოლტ-ვატური მახასიათებელი

ცალსახა ვოლტ-ვატური მახასიათებლის მისაღებად საჭიროა გაზომვები ჩავატაროთ მაგნიტური გამტარის ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში. დამაგნიტების მუდმივი დენის 0-დან I_{max} -მდე საფეხურებრივი გაზრდით შეიძლება მივიღოთ ვოლტ-ვატური მახასიათებლის ოჯახი. ვოლტ-ვატური მახასიათებლები, რომლებიც მიღებული არიან დამაგნიტების მუდმივი დენის სიდიდებით ტრანსფორმატორის უქმი სვლის მცირე დენების შემთხვევაში არ იწვევენ ინტერესს, რადგან არ ასახავენ ნარჩენი მაგნეტიზმის განმაგნიტების პროცესს.

ნახ.2.6-ზე წარმოდგენილია ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის ვოლტ-ვატური მახასიათებლის ოჯახი დამაგნიტების მუდმივი დენის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის ხ ფაზის გრაფილის მოკლედ შერთვის დროს.



ნახ.2.6. ТДН-25000/110 ტრანსფორმატორის ვოლტ-ვატური მახასიათებლების დამაგნიტების მუდმივი დენის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის, როცა დამოკლებულია ხ ფაზა

ექსპლოატაციის პროცესში მიღებული ვოლტ-ვატური მახასიათებლები საინტერესოა არა მხოლოდ დიაგნოსტიკის მიზნით, არამედ ენერგოსისტემებში ტრანსფორმატორის დამაგნიტებისას სისტემური ეკონომიური დანაკარგების შეფასებისათვის.

2.4. ვოლტ-ვატური მახასიათებლის აპროქსიმაცია

აპროქსიმაცია ეწოდება გრაფიკულად ან ცხრილის სახით მოცემული მახასიათებლისათვის ანალიტიკური გამოსახულების შედგენის პროცესს მახასიათებლის აპროქსიმაციის საჭიროება განპირობებულია ფორმულის მიღების სირთულით, რომლებიც საკმაოდ ზუსტად აღწერენ ფერომაგნიტურ მასალაში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს, რამდენადაც ეს პროცესები ძალიან რთულია და დამოკიდებულია ბევრ ფაქტორზე, რომელთა გავლენა ძნელად გასათვალისწინებელია.

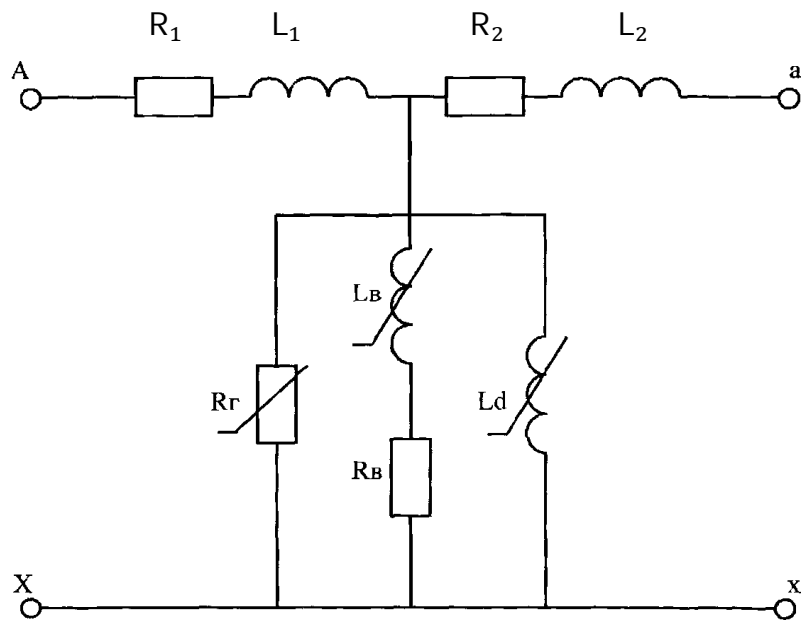
იმ შემთხვევაში, როცა ეს კარგად გამოდის, გამოსახულება, როგორც წესი, აღმოჩნდება ძალიან ვეებერთელა და მოუხერხებელი შემდგომი მათემატიკური გამოთვლებისათვის. განხილული შემთხვევების უმეტესობაში მუშა ზონა იკავებს მახასიათებლების შემოსაზღვრულ უბანს. ამიტომ, არ არის აუცილებლობა ვისარგებლოთ ზუსტი, მაგრამ ვეებერთელა უზარმაზარი გამოსახულებით, რომელიც აღწერს მთელ მახასიათებელს, საკმარისია ვისარგებლოთ უფრო მეტად უბრალო, მიახლოებითი გამოსახულებით, რომელიც აღწერს მახასიათებლის მხოლოდ მუშა უბანს.

ვოლტ-ვატური მახასიათებლის აპროქსიმაციის ამოცანა შეიძლება ფორმულირებულ იქნას, როგორც ანალიტიკური დამოკიდებულების $P(U)$ განსაზღვრა ძაბვის მოცემული მნიშვნელობებისათვის $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ და მათი შესაბამისი სიმძლავრის აქტიური დანაკარგის მნიშვნელობები $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$. ვოლტ-ვატური მახასიათებლის აპროქსიმაცია შედგება ორი დამოუკიდებელი ამოცანისაგან. ეს არის აპროქსიმირებული გამოსახულების ფუნქციონალური სტრუქტურა, ეს ნიშნავს ფუნქციის კლასის არჩევას და მუდმივების განსაზღვრას, რომელიც შედის

აპროქსიმირებად გამოსახულებაში, ანუ, რაც იგივეა, აპროქსიმაციის კოეფიციენტების განსაზღვრა.

ფუნქციის კლასის არჩევის ამოცანას არ გააჩნია ცალსახა გადაწყვეტა. ფუნქციის კლასის არჩევა ხდება ამა თუ იმ ფუნქციის მსგავსებით მაპროქსიმირებლის მახასიათებელთან, და აგრეთვე აირჩევა იმ მოსაზრებით, რომელიც დაკავშირებულია არჩეული ფუნქციის შემდგომ გამოყენებასთან.

როგორც ცნობილია დანაკარგები ფოლადში შედგება ორი ძირითადი მდგენელისაგან: დანაკარგი ჰისტერეზისზე და დანაკარგები გრიგალურ დენებზე (ფუკოს დენი). განშტოებების დამაგნიტების ჩანაცვლების სქემა ჰისტერეზისზე და გრიგალურ დენებზე დანაკარგის განაწილებით, რომელიც უზრუნველყოფს ვოლტ-ვატური მახასიათებლის გაზომვების დროს ენერგეტიკული თანაფარდობების შენარჩუნებას, წარმოდგენილია 2.7. ნახაზზე:



ნახ. 2.7. ტრანსფორმატორის ჩანაცვლების სქემა ჰისტერეზისის და გრიგალური დენების დანაკარგების გასაყოფად

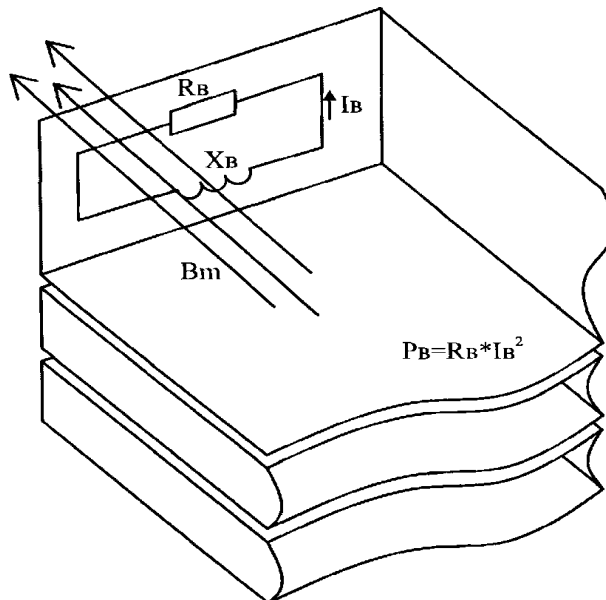
ჩანაცვლების წარმოდგენილ სქემაზე R_1, L_1, R_2, L_2 ახასიათებენ ტრანსფორმატორის პირველად და მეორად გრაგნილებს;

L_d – წარმოადგენს ტრანსფორმატორის დამამაგნიტებელი კონტურის ინდუქციურობას;

R_r – არაწრფივი წინაღობაა, რომელიც გამოხატავს დამამაგნიტების შტოში ძაბვაზე დამოკიდებულ დანაკარგს ჰისტერეზისზე;

R_B, L_B – პირობითი შტოა, რომელზედაც გრიგალურ დენებზე მაგნიტური დანაკარგების ტოლი სიმძლავრე;

გრიგალური დენის კონტურში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგი კონტურის ინდუქციურობის გათვალისწინებით შეიძლება წარმოდგენილი იქნას ექვივალენტური სქემით, რომელიც წარმოდგენილია ნახ. 2.8 –ზე;



ნახ. 2.8. გულარის მასალაში გრიგალური დენებით გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები

გრიგალური დენის აქტიური სიმძლავრე განისაზღვრება, როგორც [18]:

$$P_B = R_B I_B^2$$

სადაც $I_B = \frac{U}{Z_B}$ - გრიგალური დენია,

Z_B - კონტურის სრული წინაღობა $Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2}$,

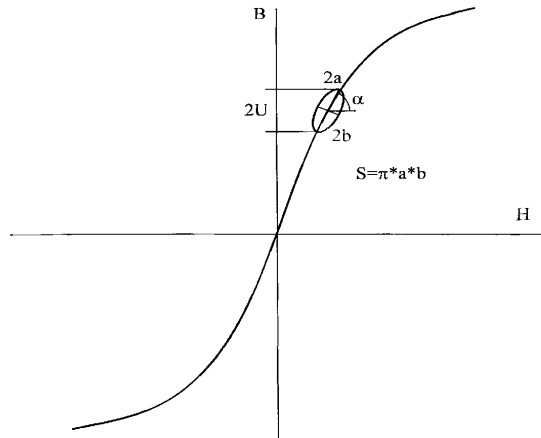
R_B - კონტურის გრიგალური დენის აქტიური წინაღობა,

X_B - კონტურის გრიგალური დენის ინდუქციური წინაღობა,

U - დამამაგნიტების შტოს ძაბვა.

დანაკარგი ჰისტერეზისზე ტოლია ჰისტერეზისის შემოსაზღვრული მარყუჟების ფართობისა. ცვლადი ველის ინდუქციის საკმაოდ მცირე ამპლიტუდის დროს ჰისტერეზისის კერძო ციკლს გააჩნია ელიფსის ფორმა

[19]. შევცვალოთ მაგნიტური ჰისტერეზის მარყუჟი ექვივალენტური ელიფსით (ნახ. 2.9.):



ნახ 2.9. ჰისტერეზისის კერძო ციკლის შევცვლა ექვივალენტური ელიფსით

რომლის დიდი ღერძი ტოლია:

$$2a = \frac{2U}{\sin(\alpha)}$$

სადაც α - დამაგნიტების მრუდის მხების დახრილობის კუთხე $B = f(H)$

U - დამაგნიტების შტოს ძაბვა.

ელიფსის მცირე ღერძი შეიძლება წარმოვადგინოთ, როგორც ძაბვის ფუნქცია:

$$2b = f(U) = 2kU^m$$

სადაც m -ჰისტერეზისის ძაბვაზე დამოკიდებულების ხარისხის მაჩვენებელია. მაშინ დანაკარგები ჰისტერეზისზე შეიძლება გამოვსახოთ ექვივალენტური ელიფსის ფართობის საშუალებით, როგორც:

$$P_r = \pi k a b = \pi k \frac{U^2}{\sin \alpha}$$

სადაც n -ჰისტერეზისზე დანაკარგების ხარისხის მაჩვენებელი $n = m + 1$;

k - მაშტაბის კოეფიციენტი.

მაგნიტოგამტარის გულარში აქტიური სიმძლავრის სრული დანაკარგი შეიძლება ასე წარმოვადგინოთ:

$$P_{CT} = \pi k \frac{U^n}{\sin(\alpha)} + \frac{U^2}{R_B}$$

თუ შევიყვანთ მნიშვნელობებს $A_1 = \frac{\pi k}{\sin(\alpha)}$ და $A_2 = \frac{l}{R_B}$, სრული დანაკარგის გამოსახულება ფოლადის მაგნიტოგამტარში შეიძლება ჩავწეროთ ასე:

$$P_{CT} = A_1 U^n + A_2 U^2$$

სადაც A_1 -ჰისტერეზისზე დანაკარგების პროპორციულობის კოეფიციენტია,

A_2 - გრიგალურ დენებზე დანაკარგების პროპორციულობის კოეფიციენტი.

ცნობილია, რომ ცდებით განსაზღვრული ფოლადში სრული კუთრი დანაკარგები, მეტია ჰისტერეზისა და გრიგალური დენების დანაკარგების ჯამზე. ეს დაკავშირებულია ფოლადში არსებულ დამატებით დანაკარგებზე.

დამოკიდებულია გაზრდილ დანაკარგებთან გრიგალური დენების გამო, რომელიც მიიღება ფოლადში არათანაბარი დამაგნიტების შედეგად. დამატებითი დანაკარგების გამოყოფა გაზომვის პროცესში არაა შესაძლებელი იმდენად, რამდენადაც ისინი არ ექვემდებარებიან ზუსტ გამოთვლებს.

ამრიგად, აქტიური სიმძლავრის დანაკარგის დამოკიდებულება ძაბვის სხვადასხვა მნიშვნელობაზე შეიძლება აპროქსიმირებული იქნას მრუდის სახით [28, 29]:

$$P_{an} = U^n \cdot A_1 + U^2 \cdot A_2$$

აპროქსიმაციის პარამეტრების განსაზღვრა ხორციელდება უმცირესი კვადრატის მეთოდით. ამ მეთოდით აპროქსიმაციის დროს აპროქსიმირებადი ფუნქცია მოცემულია n წერტილების ნაკრებით (U_1, P_1) . აპროქსიმირებული ფუნქცია P_{an} იგება, როგორც კომბინაცია ბაზისური ფუნქციებისა F_1 (ფუნქციების m რაოდენობა ჩვეულებრივ მცირეა, წერტილების n რიცხვებთან შედარებით) [22]:

$$P_{an} = \sum_{i=0}^{m-1} A_j F_j$$

ამ დროს A კოეფიციენტი ისე აირჩევა, რომ გადახრილი მაპროქსიმირებული ფუნქციის კვადრატების ჯამი, მომატებულ მნიშვნელობასთან შედარებით იყოს მინიმალური.

$$e = \sum_{i=0}^{n-1} (p_i - \sum_{j=0}^{m-1} A_j F_j)^2$$

უმცირესი კვადრატის მეთოდის ნაკლს წარმოადგენს, მისი მაღალი დამოკიდებულება საწყის მონაცემებზე, როგორც მცდარი წერტილების არსებობის მიმართ არამდგრადობის კვალი. თუ შემავალ მონაცემებს შორის ერთი რომელიმე წერტილის კოორდინატს ახასიათებს ძლიერი გადახრა დანარჩენებისაგან, მაშინ შეიძლება აპროქსიმაციის შედეგი ზუსტი არ გამოვიდეს.

ამ მოვლენის თავიდან ასაცილებლად, შემოყავთ ფუნქცია, რომელიც მოდიფიცირებას უკეთებს წერტილიდან მაპროქსიმირებელ მრუდამდე მანძილის კვადრატის ჯამს. ასე, რომ თითოეული, კონკრეტული წერტილის გავლენა მცირდება, მაპროქსიმირებელი მრუდიდან მისი აცილების მიზნით. ამ ფუნქციას აქვს სახე [23]:

$$P(r \cdot \sigma) = \frac{r^2}{\sigma^2 + r^2}$$

სადაც, r – არის მანძილი წერტილიდან მაპროქსიმირებელ მრუდამდე.

σ -პარამეტრი, რომელიც განსაზღვრავს წერტილის გავლენის შემცირების სიჩქარეს იმის გათვალისწინებით, რომ მანძილი წერტილიდან მაპროქსიმირებელ მრუდამდე, წარმოადგენს ფუნქციას, რომელიც განისაზღვრება ასე:

$$r = r(x, A)$$

სადაც, A - მაპროქსიმირებელი მრუდის პარამეტრების ვექტორია

x - წერტილის კოორდინატის ვექტორი

აპროქსიმაციის ამოცანა დაიყვანება ჯამის მინიმიზაციის ამოცანად.

$$\sum_i P(r_i(x_i A), \sigma)$$

შესაბამისი მოდიფიკაციის შეყვანა მნიშვნელოვნად ამცირებს მცდარი წერტილების გავლენას აპროქსიმაციის შედეგებზე.

საერთო ალგორითმი მაპროქსიმირებელი მრუდის პარამეტრების განსაზღვრისათვის შეიცავს შემდეგ ეტაპებს:

1. უმცირესი კვადრატების მეთოდით მივიღოთ მაპროქსიმირებელი მრუდის წერტილების კრებულის საწყისი მიახლოება, ანუ განისაზღვროს A^0 ვექტორის პარამეტრები.

2. A^0 - თვის გამოითვალოს საწყისი მიახლოება σ^0 .

3. სანამ ვექტორის პარამეტრები არსებითად იცვლება $A^n - A^{n-1} > \varepsilon$.

4. წერტილების კრებულის აპროქსიმირება, σ^{n-1} პარამეტრების გამოყენებით, შემდეგ მივიღოთ A^n ვექტორი.

5. გამოითვალოს σ^n .

აპროქსიმაციის პარამეტრების განსაზღვრა მთავრდება აპროქსიმაციის მოთხოვნილი სიზუსტის მიღწევის შედეგად, ანუ როცა განსხვავება A^n მიმდინარე და წინა მნიშვნელობასა შორის გახდება მოცემულ ε -ზე ნაკლები. მიღებული მაპროქსიმირებელი მრუდის A^n პარამეტრების ვექტორი წარმოადგენს საძიებელი მნიშვნელობის აპროქსიის A_1, A_2 კოეფიციენტებს.

2.5. ტრანსფორმატორის უქმის სვლის დენის ჰარმონიული მდგენელი

ტრანსფორმატორის უქმის სვლის რეჟიმში ჩატარებულ გაზომვებს შეესაბამება ჩანაცვლების გამარტივებული ექვივალენტური სქემა, რომელიც წარმოდგენილია ნახ.2.7-ზე. ტრანსფორმატორის ექვივალენტური სქემა, უქმი სვლის რეჟიმში შეიცავს არაწრფივ ელემენტებს, რომლებიც ახასიათებენ ტრანსფორმატორის გულარს. თუ არაწრფივ ელემენტს

მიუერთებთ სინუსოიდალურ ძაბვას, მაშინ დენი, რომელიც გაედინება ამ ელემენტის მემკობით, იქნება არასინუსოიდური და ძირითად სიხშირესთან ერთად ექნება მაღალსიხშირული ჰარმონიკები. ძირითადი არაწრფივი დამახინჯებები წარმოიშობა მაღალი მაგნიტური ინდუქციის დროს, მაგნიტურ გაჟღენთვასთან მიახლოებულ უბნებში [16]. ანუ, ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენის მნიშვნელოვანი, არაწრფივი დამახინჯებები შესაძლოა მოხდეს აღმზნებ გრაგნილზე ნომინალური ძაბვის მიწოდების დროს. ძაბვებზე, რომლებიც მნიშვნელოვნად ნაკლებია ნომინალურზე, არაწრფივი დამახინჯებები პრაქტიკულად შეუმჩნეველია.

არაწრფივი ინდუქციურობის წინააღობის სიდიდე დამოკიდებულია მასალის დამაგნიტების ხასიათზე. თავის მხრივ, დამაგნიტების ხასიათი არაწრფივია, არაცალსახაა და განისაზღვრება გულარის გეომეტრიული პარამეტრებით, ფოლადის თვისებებით და გრაგნილის მდგომარეობით.

ტრანსფორმატორის გრაგნილისა და მაგნიტური სადენის ტექნიკური მდგომარეობის მიხედვით იცვლება ჩანაცვლების სქემის ელემენტების წინააღობა, რაც თავის მხრივ გავლენას ახდენს უქმი სვლის დენის ჰარმონიულ მდგენელზე, სინუსოიდალური ძაბვის მიწოდების დროს. გარდა, ამისა, არაწრფივი ელემენტების წინააღობის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ტრანსფორმატორის გულარის მუდმივი დენით დამაგნიტების სიდიდეზე, მუშა წერტილის დამაგნიტების მრუდზე გადანაცვლებაზე [16].

მაშასადამე, ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენის ჰარმონიკების ამპლიტუდით შეიძლება გამოვლინდეს დეფექტებით გამოწვეული ცვლილებები ტრანსფორმატორში. ყველაზე მეტად გავრცელებულ და მოხერხებულ მეთოდს ანალიზებადი სიგნალის ჰარმონიული შემადგენლობის შესაფასებლად, კერძოდ ტრანსფორმატორის უქმის სვლის დენისა, წარმოადგენს ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნის მეთოდი.

ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა - ეს არის, მათემატიკური პროცედურა, რომელიც გამოყენებულია ჰარმონიული ან სიხშირული შემადგენლობის დისკრეტული სიგნალის განსაზღვისათვის. თუმცა,

დისკრეტული სიგნალი, წარმოადგენს მნიშვნელობათა ნაკრებს, რომლებიც მიღებულია უწყვეტი სიგნალის დროებით მიდამოში, პერიოდული დისკრეტიზაციის შედეგით. ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა სასარგებლოა ნებისმიერი დისკრეტული თანამიმდევრობისათვის. ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა – ერთ-ერთი, ყველაზე მეტად გავრცელებული პროცედურაა სიგნალების ციფრული დამუშავებისათვის [8].

ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნის ფორმულას, ტრიგონომეტრიულ ფორმაში, ტრანსფორმატორის უქმის სვლის დენის დროს აქვს სახე:

$$I_{xx}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} i_{xx}(n) \cos \frac{2\pi nm}{N} - j i_{xx}(n) \sin \frac{2\pi nm}{N}$$

სადაც $I_{xx}(m)$ -ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნის m -ური კომპონენტი ანუ ჰარმონიკები $I_{xx}(0), I_{xx}(1), I_{xx}(2) \dots I_{xx}(N - 1)$.

m -ინდექსი ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნის სიხშირულ უბანში, როცა $m=0, 1, \dots, N-1$.

$I_{xx}(n)$ -შემავალი ანათვლების თანმიმდევრობა $I_{xx}(0), I_{xx}(1), I_{xx}(2) \dots I_{xx}(N - 1)$, იგი წარმოადგენს მნიშვნელობების დისკრეტულ თანმიმდევრობებს, მიღებულის დისკრეტიზაციის შედეგად უწყვეტი $I_{xx}(t)$ სიგნალის დროებით მიდამოში.

n -დროებითი ინდექსი შემავალი ანათვლების $n=0, 1, 2, 3, \dots, N-1$.

N -ანათვლების რაოდენობა შემსვლელი თანმიმდევრობით და სიხშირული ანათვლების რაოდენობა ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნის შედეგის მიხედვით.

ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა გამოიყენება N ანათვლებიდან ბოლო სიმრავლისათვის, რომელიც მიღებულია f_s სიგნალის დისკრეტიზაციით N სიზუსტის გარდაქმნის მიზნით, რომლის დისკრეტული ანათვლები ასოცირდება ცალკეული ანალიტიკური სიხშირეებით $f_{ანალიზის}(m)$ [24]:

$$f_{\text{ანალიზის}}(m) = \frac{mfs}{N}, \quad (2.5)$$

(2.5) გამოსახულება ხასიათდება თავისებურებებით. რომელიც გავლენას ახდენს გარდაქმნის შედეგზე. ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა იძლევა სწორ შედეგს, მაშინ მხოლოდ, როცა მონაცემების შემსვლელი თანმიმდევრობა შეიცავს ენერგიას ზუსტად ანალიტიკურ სიხშირეზე, რომელიც წარმოადგენს ჯერადს ფუნდამენტური f_s/N სიხშირის. თუ შემსვლელი სიგნალი შეიცავს კომპონენტს რომელიმე შუალედური სიხშირით, რომელიც მოთავსებულია ანალიტიკურ mf_s/N და მაგალითად $1,5f_s/N$ -ს შორის, მაშინ ეს შემსვლელი სიგნალი გამოვლინდება რაღაც ხარისხით ანალიზის ყველა N სიხშირეზე [24]. ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნის ამ თავისებურებას ეწოდება გიბსის მოვლენა და გამოწვეულია არათანაბარი გამავლობით ფურიეს რიგისა გარღვევის წერტილში [25]. თუნდაც სარკმლის სიგნალის შეწონვა ან შეწონვითი ფუნქცია ამცირებს გიბსის მოვლენას, მისი სრულიად აღმოფხვრა შეუძლებელია. სიგნალის სარკმლით შეფასება საშუალებას იძლევა გავაკეთოთ ანგარიში საწყისსა და ბოლოში თანმიმდევრობით ერთი საერთო მნიშვნელობებით.

ამრიგად ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნის საშუალებით შეიძლება განისაზღვროს უქმი სვლის დენის არაწრფივი დამახინჯებები, მიღებული რეზულტატები შეიძლება გამოვიყენოთ ტრანსფორმატორის ტექნიკური მდგრადობის შესაფასებლად.

თავი III. დიაგნოსტიკური პარამეტრები, რომლებიც გაზომილია ტრანსფორმატორის გულარის ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში

3.1. უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვა ტრანსფორმატორის გულარის ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში

გულარის დამაგნიტების დროს გამოცდის ჩატარების პროცესში ჩვეულებრივ იყენებენ ტრანსფორმატორის ორ გრაგნილს. გრაგნილთაგან ერთ-ერთს, რომელსაც მუშა გრაგნილს უწოდებენ, გადაეცემა ცვლადი სინუსოიდალური ძაბვა, მეორე გრაგნილს, რომელსაც დამაგნიტების გრაგნილს უწოდებენ, მიუერთებენ მუდმივი დენის მარეგულირებელ გარეგან წყაროს. დამაგნიტებენ გულარს განსაზღვრულ მნიშვნელობამდე და ზომავენ ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დანაკარგებს.

დანაკარგის გაზომვას სამფაზა ტრანსფორმატორში ჩვეულებრივ აწარმოებენ მისი მიერთებით ერთფაზასთან რიგ-რიგობით გრაგნილის ერთი ფაზის მოკლე შერთვისა და დანარჩენი ორის აღზუნების გზით. მისი ერთ-ერთი გრაგნილის მოკლე შერთვას აკეთებენ იმიტომ, რომ ამ ფაზაში არ არსებობდეს მაგნიტური ნაკადი და შესაბამისად დანაკარგი.

დანაკარგის გაზომვა მცირე ძაბვის დროს ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში მიმდინარეობს შემდეგი სქემის მიხედვით:

- პირველი ცდა - ახდენენ გრაგნილის a ფაზის მოკლე შერთვას და კვებავენ ტრანსფორმატორის გრაგნილის b და c ფაზებს; მაღალი ძაბვის გრაგნილის A ფაზაზე აწოდებენ მუდმივ დენს და ზომავენ დანაკარგს P'_{0bc} ,
- მეორე ცდა - ახდენენ გრაგნილის b ფაზის მოკლე შერთვას, კვებავენ ტრანსფორმატორის a და c ფაზის გრაგნილებს, აწვდიან მუდმივ დენს მაღალი ძაბვის გრაგნილის B ფაზაზე და ზომავენ დანაკარგს P'_{0ac} .

- მესამე ცდა - ახდენენ გრაგნილის c ფაზის მოკლე შერთვას, კვებავენ ტრანსფორმატორის a და b ფაზის გრაგნილებს, აწვდიან მუდმივ დენს მაღალი ძაბვის გრაგნილის C ფაზაზე და ზომავენ P'_{0ab} .

მიუხედავად იმისა, მაღალი ძაბვის მხარეზე შეიძლება დაბალი ძაბვის მხრიდან მიწოდებული ძაბვის ტრანსფორმაცია, მუდმივი დენის წყაროს მიერთება მაღალი ძაბვის ფაზასთან იმავე ფაზის დაბალი ძაბვის გრაგნილის დამოკლებისას აბსოლიტურად უსაფრთხოა, რადგანაც ამ ფაზაზე ძაბვა არ ტრანსფორმირდება.

3.1. ნახაზზე წარმოდგენილია ტრანსფორმატორის გულარის ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში ჩატარებული გაზომვის სქემა. თუ მოვახდენთ ერთ-ერთი ფაზის მოკლე შერთვას, ხოლო დანარჩენ ორ ფაზას მოვდებთ ცვლად ძაბვას (დაბალი ძაბვების), მაშინ გაზომილი დანაკარგები ახასიათებენ იმ ენერგიას, რომელიც დაიკარგა გახსნილი ფაზების აღზუნებაზე. მაღალი ძაბვის ჩაკეტილი ფაზის გრაგნილის გამომყვანებს აერთებენ მუდმივი დენის რეგულირებად წყაროსთან. ამგვარად, შეიძლება გადაღებული იქნას სიმძლავრის და უქმი სვლის დანაკარგების დამოკიდებულება დამაგნიტების მუდმივი დენის სიდიდესთან.

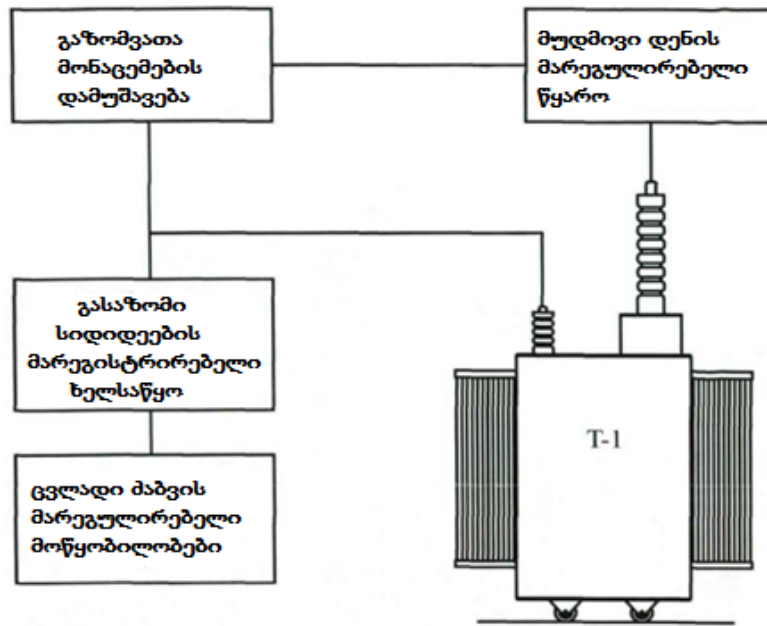
როცა გვეცოდინება დანაკარგები სხვადასხვა ფაზებში, შეიძლება შევადაროთ ისინი და დავრწმუნდეთ, რომ ტრანსფორმატორის ფაზებში არის თანაბარი დანაკარგები და მას დეფექტი არ გააჩნია.

თუ მაგნიტოგამტარის რომელიმე ღეროს ძირითადი მაგნიტური ნაკადის გარშემო წარმოიშობა რაიმე მოკლედშერთული ხვია, მაშინ ამ სქემით გაზომილი დანაკარგებს შორის თანაფარდობა შეიცვლება. ამასთანავე მოკლედშერთული ხვიის გამოჩენა იწვევს დანაკარგის გაზრდას, ამიტომ დეფექტური იქნება ის ფაზა, რომლის დამოკლების დროს გაზომილი დანაკარგი იქნება უმცირესი. ეს კანონზომიერება გამოიყენება დეფექტური ფაზის გამოსავლენად. გაზომილი მახასიათებლების

შედარებამ წინა გაზომილთან შეიძლება მოგვცეს ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის მდგომარეობისა ცვლილება.

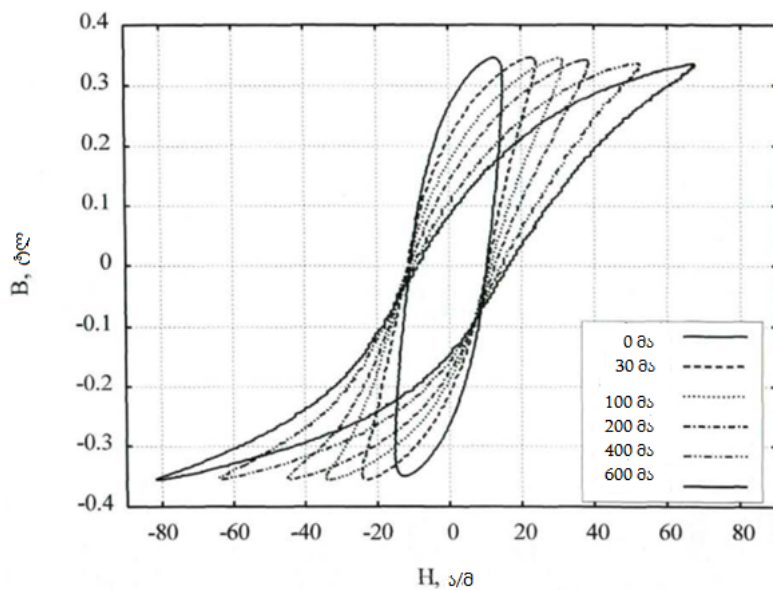
ზოგადად ტრანსფორმატორის გულარის დამაგნიტებისას გადამაგნიტება მიმდინარეობს ჰისტერეზისის არასიმეტრიული მარყუჟებით. ორივენი გულარის მუშა წერტილები დროის ერთსა და იმავე მომენტში დამაგნიტების მრუდის სხვადასხვა უბანში იმყოფებიან. ეს დაკავშირებულია, იმასთან, რომ დროის ერთ მომენტში ერთ-ერთი გულარის მაგნიტური ველი B_m , რომელიც შექმნილია ცვლადი ძაბვით, ემთხვევა გრაგნილის დამაგნიტების ველს, ხოლო მეორე გულარის ველი B_m მიმართულია დამაგნიტების გრაგნილის მუდმივი ველის საწინააღმდეგოდ. მცირე ძაბვების დროს გაჯერების მდგომარეობაში ჰისტერეზისის მარყუჟებში ასიმეტრიულობა უმნიშვნელოა [19]. 3.2. ნახ-ზე წარმოდგენილია 3340 მარკის ფოლადის ჰისტერეზისის კერძო მარყუჟები შეთავსებული ცენტრებით, დამაგნიტების მუდმივი დენის სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს.

დამაგნიტების რეჟიმში გაზომვები საშუალებას იძლევიან გამოვლინდეს დეფექტები, რომლებიც განპირობებულია მაგნიტური ველის გავლენის გამო მაგნიტური კონსტრუქციის გეომეტრიის ცვლილებით, და რომლებიც გამოვლინდება მხოლოდ სამუშაო რეჟიმში და ქრებიან ძაბვის მოხსნისთანავე.



ნახ. 3.1. ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში გაზომვების ჩატარების სქემა

მაგნიტური სისტემის დამაგნიტების დროს დიაგნოსტიკის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ მუდმივი დენით სწარმოებს მაგნიტური სისტემის გადაყვანა დამაგნიტების საჭირო წერტილში, ხოლო ცვლადი დენით სწარმოებს მაგნიტური სისტემის თვისებების განსაზღვრა ამ წერტილის მიდამოში. ამგვარად, აღდგება მაგნიტოგამტარის ზოგადი მახასიათებელი.



ნახ. 3.2. 3340 ფოლადის ჰისტერეზისის კერძო მარყუჯები შეთავსებული ცენტრებით სხვადასხვა დამაგნიტების დენის დროს

3.2. სამფაზა მაგნიტური სისტემის ელემენტებში ინდუქციურობის განსაზღვრა გულარის მუდმივი დენით დამაგნიტების დროს

განვიხილოთ სამფაზიანი მაგნიტური სისტემა ალგუნების კოჭათი, რომელიც განლაგებულია მარცხენა განაპირა ღეროზე (ფაზა A) შუა ღეროზე (ფაზა B) მარცხენა განაპირა ღეროზე (ფაზა C). ალგუნების კოჭა შედგება w_0 ხვიებისაგან. A, B და C ფაზებისათვის ღეროების შეპირაპირების ზონები და მაგნიტური სისტემის აწყობილი უღელი ჩათვლილია შესაბამისად da, db, dc საჰაერო ღრეჩოების ექვივალენტურად. მაგნიტური სისტემის ძირითადი გეომეტრიულ ზომებს წარმოადგენენ [8]:

- ღეროს აქტიური კვეთი S_c
- უღლის აქტიური კვეთი $S_{ულ}$
- უღლის სიმაღლე $h_{ულ}$
- ღეროს სიგრძე L_c
- დაშორება მეზობელი ღეროს ღერძებს შორის C_c

მაგნიტური გამტარის მასალად შერჩეულია ელექტროტექნიკური ფოლადი, რომლის მაგნიტური ინდუქციის ველის დამაბულობაზე დამოკიდებულება ცნობილია. აღმგზნები კოჭების მარცხენა განაპირა ღეროზე (ფაზა A) განლაგების დროს მაგნიტური ნაკადებს ღეროებში აქვთ დამოკიდებულება:

$$\Phi_a = \Phi_b + \Phi_c$$

მაგნიტურ პოტენციალთა სხვაობა განშტოების წერტილებს შორის B ფაზის ცენტრალური ღეროსათვის

$$U_o = H_{cb}(L_c + h_{\text{უღ}}) + \Phi_b R_{db} \quad (3.1)$$

C ფაზის ღეროსათვის

$$U_o = H_{cc}(L_c + h_{\text{უღ}}) + H_{\text{უღ},c}(2C_c) + \Phi_c R_{dc} \quad (3.2)$$

A ფაზის ღეროსათვის

$$U_o = I W_o - H_{ca}(L_c + h_{\text{უღ}}) + H_{\text{უღ},a}(2C_c) + \Phi_a R_{da} \quad (3.3)$$

სადაც H_{ca}, H_{cb}, H_{cc} - შესაბამისი ფაზების ღეროებში მაგნიტური ველის დამაბულობებია,

$H_{\text{უღ},a}, H_{\text{უღ},b}, H_{\text{უღ},c}$ - მაგნიტური ველის დამაბულობებია შესაბამის ფაზებთან მომიჯნავე უღლებში;

Φ_a, Φ_b, Φ_c - მაგნიტური ნაკადებია შესაბამის ფაზებთან მომიჯნავე ღეროებსა და უღლებში;

R_{da}, R_{db}, R_{dc} - da, db, dc საჰაერო ღრეჩოების მაგნიტური წინაღობებია

l - დენია აღმგზნებ კოჭაში.

საჰაერო ღრეჩოების მაგნიტური წინაღობები განისაზღვრება როგორც:

$$R_{da} = \frac{da}{\mu_0 S_c}$$

$$R_{db} = \frac{db}{\mu_0 S_c}$$

$$R_{dc} = \frac{dc}{\mu_0 S_c}$$

სადაც μ_0 - მაგნიტური მუდმივია და ტოლია $4\pi * 10^{-7}$ ჰნ/მ.

(3.1) (3.2) (3.3) არაწრფივი განტოლებების ერთობლივი ამოხსნა დამაგნიტების I დენის მოცემული მნიშვნელობების დროს გვაძლევს საშუალებას განვსაზღვროთ მაგნიტური ნაკადები თითოეულ ღეროში და შესაბამისი ინდუქციები ღეროებში:

$$B_{ca} = \frac{\Phi_a}{S_c}$$

$$B_{cb} = \frac{\Phi_b}{S_c}$$

$$B_{cc} = \frac{\Phi_c}{S_c}$$

დავუშვათ, რომ მაგნიტური ნაკადი ერთი ფაზის უღელში და ღეროში ტოლია, მაშინ უღლის ინდუქცია განისაზღვრება ასე:

$$B_{უღ.a} = \frac{\Phi_a}{S_{\text{წ}}}$$

$$B_{უღ.c} = \frac{\Phi_c}{S_{\text{წ}}}$$

ანალოგიური განტოლებები შედგენილი B და C ფაზების ღეროების დამაგნიტების შემთხვევისათვის საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ, ინდუქცია ღეროებში ამ რეჟიმებისთვის.

ჩავატაროთ ТРДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის ღეროებში ინდუქციის გაანგარიშება ადრე შემოთავაზებული სქემის მიხედვით გულარის დამაგნიტების დროს. ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემა - ბრტყელი ღეროვანი კაზმული. მაგნიტური სისტემის ძირითადი მახასიათებლები და გეომეტრიული ზომებია [8] :

ფოლადის მარკა - 33405

ფოლადის სისქე - 0.3მმ

ფოლადის სიმკვრივე - 7650 კგ/მ³

მაგნიტური B ინდუქციის ნორმირებული მაჩვენებლები მაგნიტური ველის დაძაბულობის 100 ა/მ-ის შემთხვევაში - 1,61 ტლ.

ნორმირებული კუთრი დანაკარგები $P_{კუთ}$ ინდუქციებისა დროის.

$B = 1,5$ ტლ - 0,97ვტ/კვ

$B = 1,7$ ტლ - 1,4 ვტ/კვ

მაგნიტური გამტარის ღეროს აქტიური კვეთი S_c - 0,27768მ²

მაგნიტური გამტარის უღლის აქტიური კვეთი $S_{ულ}$ - 0.28397მ²

უღლის სიმაღლე $h_{ულ}$ - 0,46მ

ღეროს სიგრძე L_c - 2,38მ

მეზობელი ღეროების ღერძებს შორის დაშორება C_c - 1,28 მ.

შეპირაპირების ზონაში საჰაერო ღერო

da - 100 * 10⁻⁶მ

db - 100 * 10⁻⁶მ

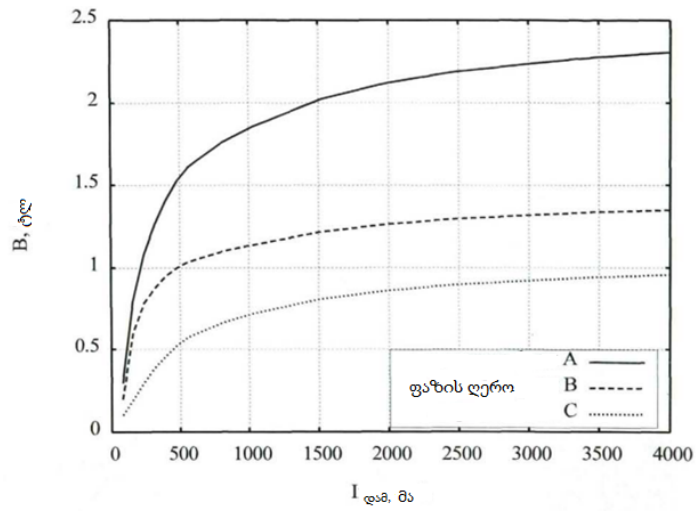
dc - 100 * 10⁻⁶მ

მაღალი ძაბვის გრაგნილის ხვიათა რიცხვი - 1250

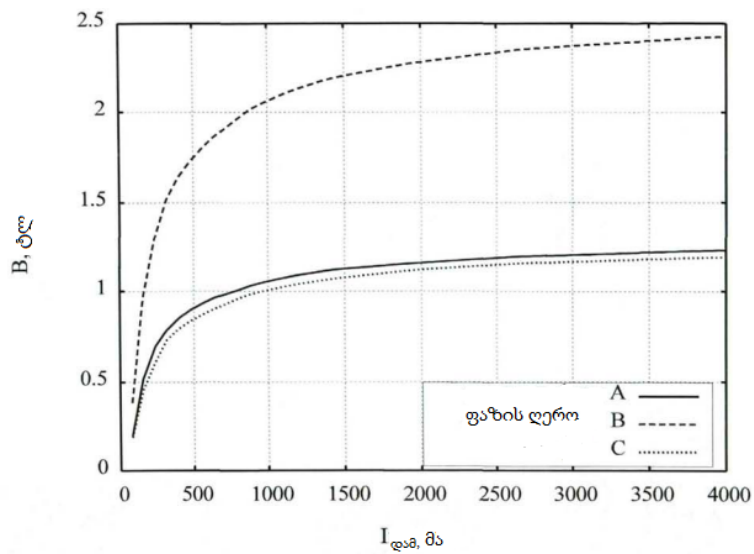
ტრანსფორმატორის გულარის დამაგნიტება ხდება მაღალი ძაბვის გრაგნილის დახმარებით. A , B და C ფაზების საჰაერო ღრეჩოებს შორის სხვაობა წარმოადგენს მაგნიტური სისტემის კაზმის ასიმეტრიას. ინდუქციის გამოთვლის შედეგები ტრანსფორმატორის ღეროს სხვადასხვა რეჟიმში დამაგნიტების დროს წარმომადგენელია ნახ. 3.3 და 3.5-ზე.

გამოთვლის შედეგებიდან ჩანს, რომ B ფაზის გრაგნილის მეშვეობით დამაგნიტებისას მაგნიტური სისტემის კაზმში ასიმეტრიის შედეგად ($dc > da$) ინდუქციის განაწილება განაპირა ღეროებზე განსხვავებულია. A ფაზის ღეროში ინდუქცია მეტია, ვიდრე C ფაზის ღეროში.

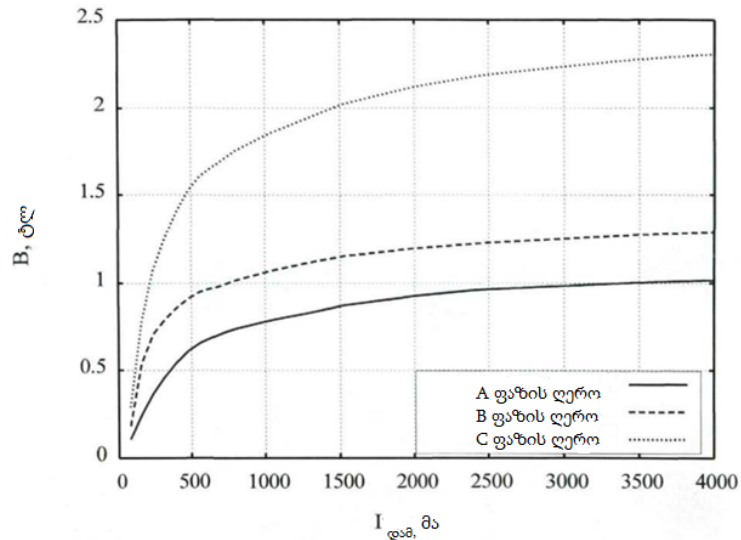
A ფაზის გრაგნილის დახმარებით კიდურა ღეროს დამაგნიტების რეჟიმში B ფაზის ღეროში ინდუქცია მნიშვნელოვნად აღემატება C ფაზის ღეროს ინდუქციას. საჰაერო ღრეჩოების ერთნაირი მნიშვნელობების დროს ($dc = da$) B ფაზის გრაგნილის დახმარებით გულარის დამაგნიტების რეჟიმში ინდუქცია A ფაზის ღეროში ტოლია ინდუქციისა C ფაზის ღეროში.



ნახ. 3.3. ტრანსფორმატორის ღეროებში მაგნიტური ინდუქციის განაწილება მარცხენა განაპირა (A ფაზის) ღეროს დამაგნიტებისას მაგნიტური სისტემის C ფაზის კაზმის ასიმეტრიისას



ნახ. 3.4. ტრანსფორმატორის ღეროებში მაგნიტური ინდუქციის შუა (B ფაზის) ღეროს დამაგნიტებისას მაგნიტური სისტემის C ფაზის კაზმის ასიმეტრიისას



ნახ. 3.5. ტრანსფორმატორის (ღეროებში) მაგნიტური ინდუქციის განაწილება მარჯვენა განაპირა ღეროს (C ფაზის) მაგნიტური სისტემის C ფაზის კაზმის ასიმეტრიისას

3.3. უქმი სვლის დანაკარგის განსაზღვრა მცირე ძაბვების დროს ერთ-ერთი ღეროს მუდმივი დენით დამაგნიტების რეჟიმში

ტრანსფორმატორის გულარის დამაგნიტება მუდმივი დენით იწვევს მაგნიტური გამტარის ფოლადში კუთრი დანაკარგის ზრდას. დამაგნიტების მუდმივი დენის გაზრდა იწვევს ჰისტერეზისის კერძო მარყუჟების ფართობების გაზრდას (ნახ. 3.2.), რაც იწვევს დანაკარგების გაზრდას ჰისტერეზისზე. დამაგნიტების რეჟიმში მაგნიტური გულარის შეღწევადობა მცირდება და გრიგალური კონტურის ინდუქციურობა მცირდება, შედეგად იზრდება გრიგალური დენები, რასაც მივყავართ გრიგალური დანაკარგების გაზრდამდე. კუთრი მაგნიტური დანაკარგების შესამჩნევი ზრდა ჩნდება მხოლოდ დამაგნიტების მრუდის ნალუნის ნაკეცის ზემოთ [27,19].

3.6. ნახაზზე წარმოდგენილია კუთრი დანაკარგების გადამეტების კოეფიციენტის დამოკიდებულება მაგნიტური B_0 ინდუქციის [31] მუდმივ

მდგენელზე. წარმოდგენილი დამოკიდებულება ატარებს მიახლოებით ხასიათს, რომელიც ასახავს კუთრი დანაკარგების ზრდას მაგნიტური ინდუქციის მუდმივი მდგენელის გაზრდის დროს. ზუსტი მახასიათებელი ფოლადის თითოეული სახეობისათვის იზომება ცდების ჩატარების გზით.

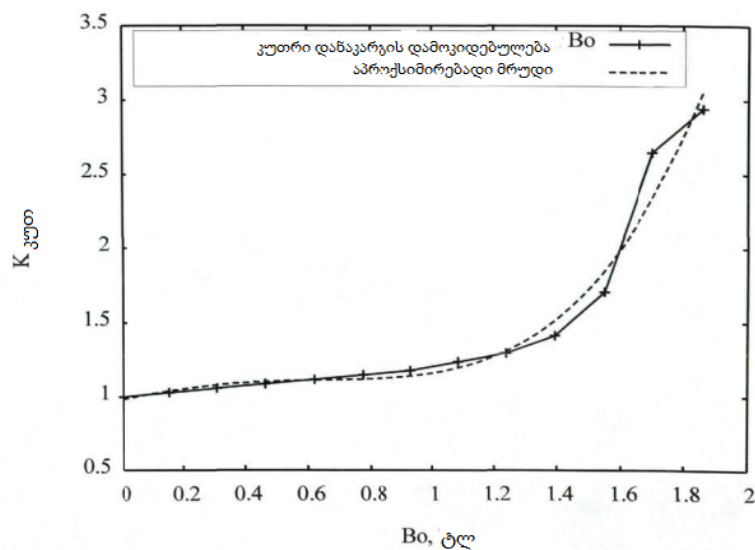
ფოლადში კუთრი დანაკარგები ინდუქციის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის განისაზღვრება როგორც:

$$P_{კუთ}(B_o) = P_{კუთ} K_{კუთ}$$

სადაც $P_{კუთ}$ – კუთრი დანაკარგების ნორმირებული მაჩვენებელია

$K_{კუთ}$ – კუთრი დანაკარგის კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება

3.6. ნახაზზე წარმოდგენილი გრაფიკის მიხედვით.



ნახ. 3.6. მაგნიტოგამტარში კუთრი მაგნიტური დანაკარგების ზრდის მაგნიტური ველის მუდმივი მდგენელის სიდიდეზე დამოკიდებულების მაგალითი და მისი მაპროქსიმირებელი მრუდი

მაგნიტოგამტარის მუდმივი დენით დამაგნიტების დროს უქმი სვლის დანაკარგის გამოთვლის გასამარტივებლად მოვახდინოთ 3.6. ნახაზზე წარმოდგენილი დამოკიდებულების აპროქსიმაცია პოლინომით, რომელსაც აქვს სახე:

$$K_{კუთ}(B_o) = (c_4 B^4 + c_3 B^3 + c_2 B^2 + c_1 B^1 + c_0)$$

სადაც C_4, C_3, C_2, C_1, C_0 - აპროქსიმაციის კოეფიციენტებია.

აპროქსიმაციის კოეფიციენტებს აქვთ შემდეგი მნიშვნელობები $C_4 = 0.1852, C_3 = -0.1687, C_2 = -0.1418, C_1 = 0.214, C_0 = 0.4913$. მოცემული კოეფიციენტების მიხედვით აპროქსიმაციის საიმედოობის სიდიდე შეადგენს $R^2 = 0.9704$. მააპროქსიმირებელი მრუდი წარმოდგენილია 3.6. ნახაზზე.

მაშინ, მაგნიტოგამტარის ელემენტებში ინდუქციის უკვე ცნობილი მნიშვნელობების დროს A ფაზის გრაგნილის დახმარებით გულარის მუდმივი დენით დამაგნიტების რეჟიმში კუთრი დანაკარგები განისაზღვრება ფორმულით:

$$P_{აშ.ა} = P_{კუთ} (G_{ლ.ბ} K_{კუთ}(B_{ლ.ბ}) + G_{ლ.ც} K_{კუთ}(B_{ლ.ც}) + G_{ულ.ა} K_{კუთ}(B_{ულ.ა}))$$

სადაც $G_{ლ.ბ}$ - ლეროს B ფაზის მასაა,

$G_{ლ.ც}$ - C ფაზის ლეროს მასაა

$G_{ულ.ა}$ - C ფაზის უღლის მასაა

C ფაზის გრაგნილის დახმარებით გულარის მუდმივი დენით დამაგნიტების რეჟიმისათვის გვექნება:

$$P_{აშ.ა} = P_{კუთ} (G_{ლ.ბ} K_{კუთ}(B_{ლ.ბ}) + G_{ლ.ა} K_{კუთ}(B_{ლ.ა}) + G_{ულ.ა} K_{კუთ}(B_{ულ.ა}))$$

სადაც $G_{ლ.ა}$ - ლეროს A ფაზის ლეროს მასაა.

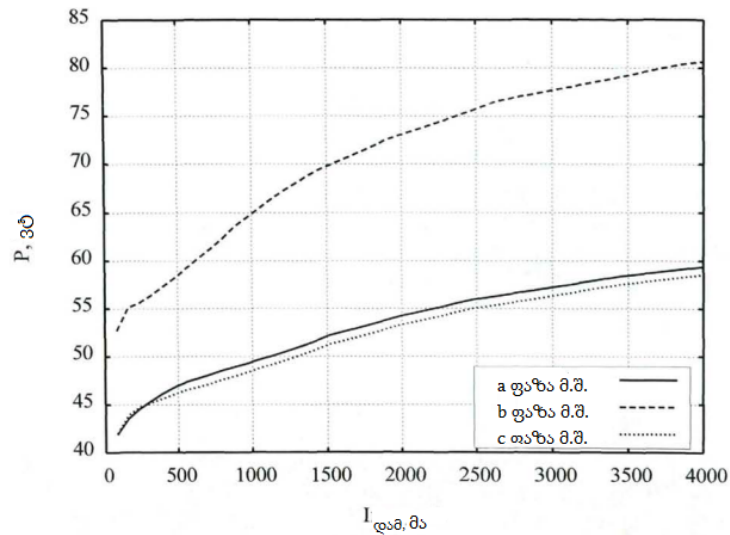
$G_{ულ.ა}$ - A ფაზის უღლის მასაა.

B ფაზის გრაგნილის დახმარებით გულარის მუდმივი დენით დამაგნიტების რეჟიმისათვის გვექნება: $P_{აშ.ბ} = P_{კუთ} (G_{ლ.ა} K_{კუთ}(B_{ლ.ა}) + G_{ულ.ა} K_{კუთ}(B_{ულ.ა})) + P_{კუთ} (G_{ლ.ც} K_{კუთ}(B_{ლ.ც}) + G_{ულ.ა} K_{კუთ}(B_{ულ.ა}))$

სადაც $B_{ლ.ა}, B_{ლ.ბ}, B_{ლ.ც}$ - A, B და C ფაზების ლეროების ინდუქციებია, $B_{ულ.ა}, B_{ულ.ა}$ A და C ფაზებთან მოსაზღვრე უღლების ინდუქციებია.

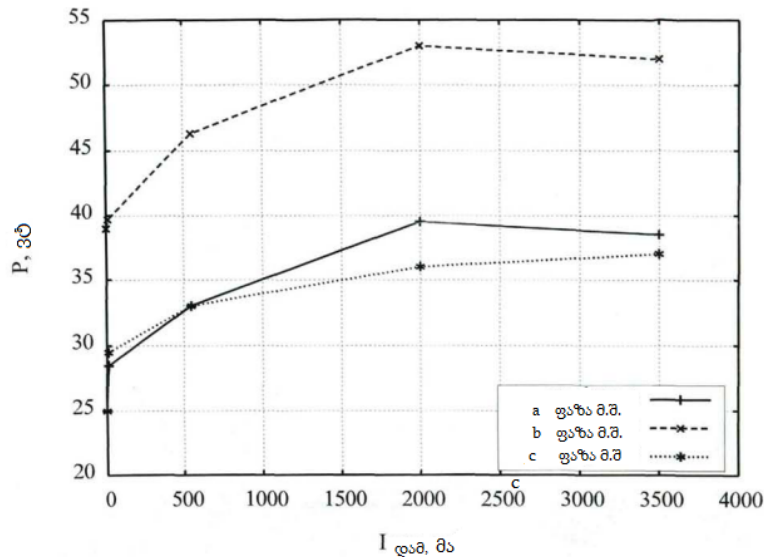
ТРДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის მაგნიტური დანაკარგის გამოთვლის შედეგები ნაჩვენებია ნახ.3.7-ზე. მაგნიტოგამტარის ელემენტებში ინდუქციის მნიშვნელობები აღებულია წინა თავში მიღებული შედეგებით, მაგნიტური სისტემის კაზმში ასიმეტრიის

არსებობის შემთხვევიდან. A ფაზის გრაგნილით დამაგნიტების შემთხვევაში დანაკარგი მეტია ვიდრე C ფაზის გრაგნილით დამაგნიტების შემთხვევაში რაც დაკავშირებულია ფაზებში ინდუქციების განსხვავებასთან.



ნახ. 3.7. ТРДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის მაგნიტური დანაკარგის საანგარიშო დამოკიდებულება მუდმივი დამამაგნიტებელი დენის სიდიდეზე C ფაზის მაგნიტური სისტემის კაზმის ასიმეტრიისას

შედარებისათვის ნახ.3.8-ზე წარმოდგენილია ТДТН-63000/110 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის პრაქტიკულად გაზომილი უქმი სვლის დანაკარგების დამაგნიტების მუდმივი დენის სიდიდეზე დამოკიდებულება. უქმი სვლის დანაკარგის დამაგნიტების მუდმივი დენის სიდიდეებზე გამოთვლილი და ცდით მიღებული დამოკიდებულებები ხასიათებიან საერთო თვისებებით. განსხვავება მაგნიტური დანაკარგების სიდიდეებში განაპირა ფაზებში შეიძლება გამოწვეული იყოს არა მხოლოდ ერთ-ერთ ფაზაში მოკლედშერთული კონტურის გაჩენით, არამედ შეპირაპირების ღეროსა და უღლის ზონებში მაგნიტური წინაღობის ცვლილებით.



ნახ. 3.8. ТДТН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დანაკარგის დამაგნიტების მუდმივი დენის სიდიდეზე ცდით მიღებული დამოკიდებულება

3.4. ტრანსფორმატორის გაბარიტური ზომების გავლენა უქმი სვლის დანაკარგებზე

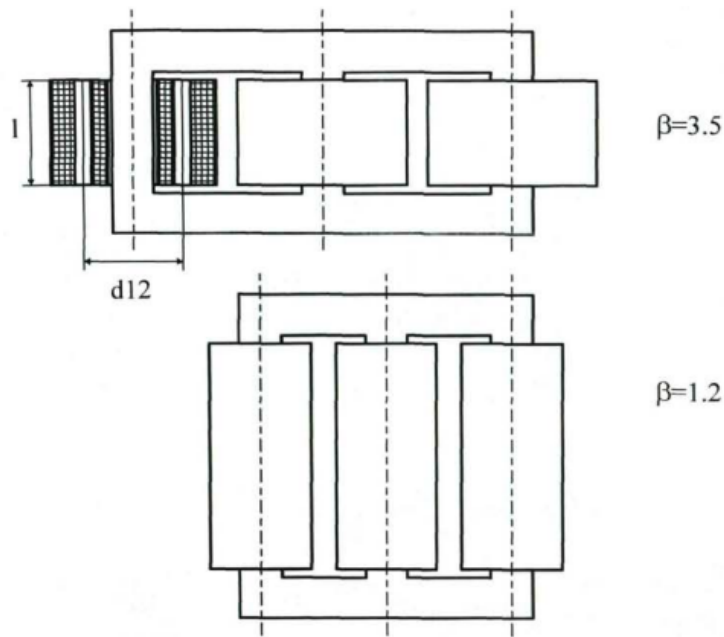
პრაქტიკაში ტრანსფორმატორების დაპროექტებისას გამოიყენება სიდიდე β , რომელიც განსაზღვრავს გრაგნილის სიმაღლისა და დიამეტრს შორის დამოკიდებულებას [5].

$$\beta = \frac{\pi d_{12}}{l}$$

სადაც d_{12} – გრაგნილებს შორის არსებული წრეხაზის დიამეტრი.

l – გრაგნილის სიმაღლე.

კონსტრუქციული β პარამეტრი ტრანსფორმატორების არსებულ სერიებში იმყოფება ზღვრებში 1–დან 3,5–მდე. β -ს ნაკლებ მნიშვნელობებს შესაბამება ვიწრო და მაღალი ტრანსფორმატორი, ხოლო β -ს მეტ მნიშვნელობებს კი შეესაბამება ფართო და დაბალი ტრანსფორმატორები (ნახ.3.9.) [5].



ნახ. 3.9. ორი ტრანსფორმატორის ზომების შედარება კონსტრუქციული β პარამეტრის სხვადასხვა მნიშვნელობისას

არსებობს ცალმხრივი დამოკიდებულება β პარამეტრსა და უქმი სვლის დანაკარგს K_{ba} -ს შორის, a და b ფაზების გრაგნილების დამოკლების დროს, რადგანაც β -ს სხვადასხვა მნიშვნელობებს შეესაბამება მაგნიტური გზის სხვადასხვა სიგრძე. β -ს დიდი მნიშვნელობის მქონე ტრანსფორმატორებისათვის a და b ფაზების გრაგნილების დამოკლების დროს, მაგნიტური გზის სიგრძე უფრო მეტი აქვთ, ვიდრე იმ ტრანსფორმატორისათვის რომელთაც β -ს მცირე მნიშვნელობა აქვთ.

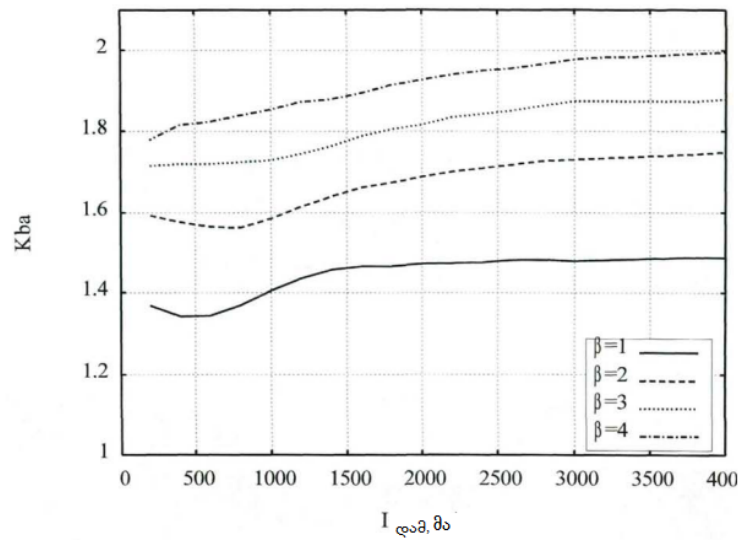
დამოკიდებულება K_{ba} განისაზღვრება, როგორც:

$$K_{ba} = \frac{P_{a\beta b}}{P_{a\beta a}}$$

სადაც - $P_{a\beta b}$ უქმი სვლის დანაკარგია b ფაზის გრაგნილის დამოკლების დროს.

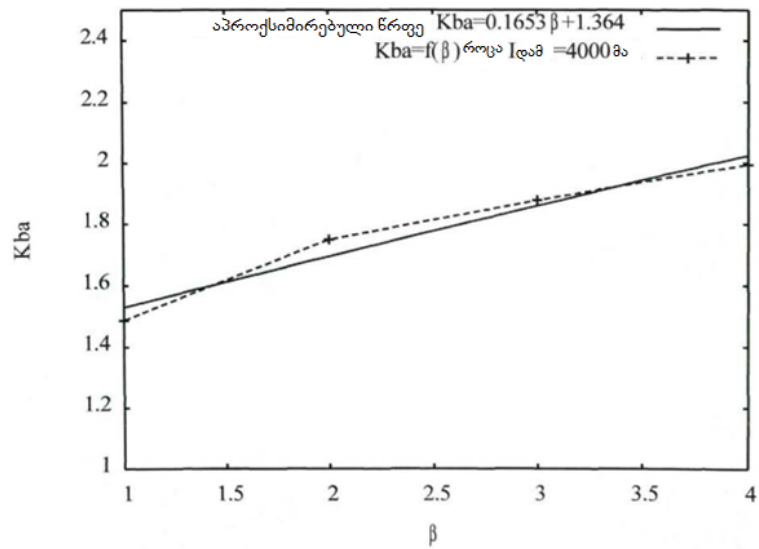
$P_{a\beta a}$ - უქმი სვლის დანაკარგია a ფაზის გრაგნილის დამოკლების დროს. ანალოგიურად შეიძლება მოიძებნოს უქმი სვლის დანაკარგის თანაფარდობა K_{bc} c და b ფაზების გრაგნილების დამოკლების

შემთხვევაში. ჩვეულებრივ, ტრანსფორმატორებში K_{ba} -სა და K_{bc} -ს შორის სხვაობა უმნიშვნელოა.

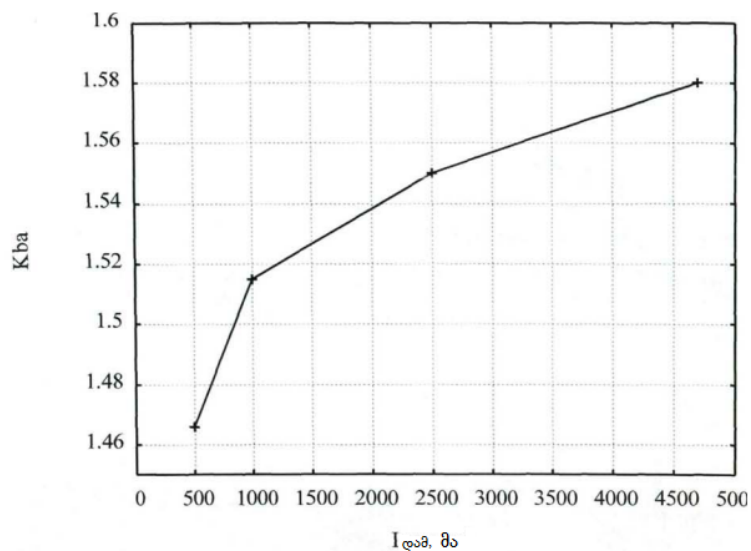


ნახ. 3.10. K_{ba} ფარდობის გამოსათვლელი დამოკიდებულება β -ს სხვადასხვა მნიშვნელობისას

3.10. ნახაზზე წარმოდგენილია K_{ba} ფარდობის გამოსათვლელი დამოკიდებულება β სხვადასხვა მნიშვნელობებისას. ამ ნახაზზე დიდი განსხვავება $P_{ააბ}$ და $P_{ააа}$ - ს შორის დიდ სხვაობას ადგილი აქვს ფართო და დაბალი ტრანსფორმატორებისათვის, ხოლო მცირე სხვაობას – ვიწრო და მაღალი ტრანსფორმატორებისათვის. 3.10. ნახაზიდან ჩანს, რომ გაჯერების არეალში K_{ba} ნაკლებად დამოკიდებულია დამაგნიტების მუდმივ დენზე, მაგრამ ერთმნიშვნელოვნად დამოკიდებულია კონტრუქციულ β პარამეტრზე. ეს დამოკიდებულება 4000 მა დამაგნიტების დენის დროს წარმოდგენილია ნახ. 3.11.



ნახ. 3.11. K_{ba} ფარდობის გამოთვლის დამოკიდებულება β კონსტრუქციულ პარამეტრზე 4000 მ დამაგნიტების დენის დროს



ნახ. 3.12. K_{ba} ფარდობის ცდისეული დამოკიდებულება დამაგნიტების მუდმივ დენზე TДТН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის

ნახ.3.12-დან ჩანს, რომ დამაგნიტების დენი საკმაოდ დიდი მნიშვნელობის დროს, რაც არის ნაჯერობის მდგომარეობა, ფარდობა K_{ba} იცვლება უმნიშვნელოდ. მაშასადამე, K_{ba} შედეგების გაფანტვის ინტერვალის შემცირებისათვის მისი β პარამეტრზე დამოკიდებულების განსაზღვრა უკეთესად მიმდინარეობს გულარის გაჯერების მდგომარეობაში.

მაპროქსიმირებელი წრფე $K_{ba} = 0,1653\beta + 1,364$, რომელიც წარმოდგენილია ნახ. 3.11. საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ ცდისეული დამოკიდებულების დიაგნოსტიკური შეფასება უქმი სვლის დამაგნიტების დენის მოცემული მნიშვნელობასა და გამოთვლით მიღებულ მნიშვნელობასთან. K_{ba} ფარდობის ანგარიშის განსაზღვრა ხდება მაპროქსიმირებელი გამოსახულების β პარამეტრზე დამოკიდებულებიდან, რომლებიც შეიძლება ვნახოთ ტრანსფორმატორის ძირითადი კონსტრუქციული პარამეტრის მონაცემებში.

3.5. ტრანსფორმატორის განაპირა ფაზების უქმი სვლის დანაკარგების მახასიათებლების ასიმეტრია დამაგნიტების რეჟიმში

ღეროვანი ტიპის სამფაზა ბრტყელი მაგნიტური სისტემისათვის დამახასიათებელია ღეროს განაპირა A და C ფაზების აბსოლუტური გეომეტრიული სიმეტრია. ამიტომ მაგნიტოგამტარის ხარისხიანი კაზმის შესრულების დროს ცდებისთვის საჭირო გრაგნილის დამოკლებული a და c ფაზების მახასიათებლები არიან იდენტურები. მაგრამ, პრაქტიკაში ექსპლუატაციაში არსებობენ ტრანსფორმატორები, რომელთაც A და C ფაზების ღეროებისათვის აქვთ უქმი სვლის დანაკარგების სხვადასხვა მნიშვნელობები (ნახ. 3.8.).

a და c ფაზების გრაგნილების დამოკლების დროს ცდებისათვის მახასიათებლების ასიმეტრია შეიძლება შევავსოთ K_{ac} ფარდობით რომელიც განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$K_{ac} = \frac{P_{a\bar{a}a}}{P_{a\bar{a}c}}$$

სადაც $P_{a\bar{a}a}$ - უქმი სვლის დანაკარგია a ფაზის გრაგნილის დამოკლების დროს,

$P_{a\bar{a}c}$ - უქმი სვლის დანაკარგია c ფაზისგრაგნილის დამოკლების დროს, დროს.

ასიმეტრია შეიძლება დავყოთ ორ სახეობად: სტაბილური და დინამიური. სტაბილური ასიმეტრია ყალიბდება მაგნიტოგამტარის დამზადების სტადიაში. სტაბილური ასიმეტრიის აღმოცენების ძირითად მიზეზად გვევლინება:

- მაგნიტოგამტარის ფოლადის მარჯვენა და მარცხენა ღეროს ელექტროტექნიკური თვისებების განსხვავება.
- მაგნიტური სისტემის აწყობის ხარისხი.
- ფირფიტის ღეროსა და უღლის შეპირაპირების ხარისხი.
- ღეროსა და უღლის შეპირაპირის ზონაში ნაწიბურის დამუშავების მეთოდი.
- ფოლადის პაკეტების აწყობისას დაწნეხვის არათანაბრობა.

მოცემული სტაბილური ასიმეტრია გამოვლინდება უქმი სვლის დანაკარგების გაზომვებისას დამამზადებელ ქარხანაში და გამოჩნდება დანაკარგის განსხვავება ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარის განაპირა ღეროებზე.

სტაბილური ასიმეტრია არ ახდენს გავლენას ტრანსფორმატორის მუშაობაზე და გათვალისწინებულ უნდა იქნას დიაგნოსტიკის დროს.

დინამიური ასიმეტრია ხასიათდება დროთა განმავლობაში დამოკლებული a ფაზის გრაგნილისა და დამოკლებული c ფაზის გრაგნილის დროს განსაზღვრული უქმი სვლის დანაკარგებს შორის სხვაობის გაზრდით. დინამიური ასიმეტრიის წარმოშობის მიზეზად გვევლინება:

- მოკლე შერთვები, რომლებიც გამოწვეულია მაგნიტოსადენის მექანიკური დეფორმაციებით.
- ფოლადის მაგნიტოგამტარის სითბური დარტყმა, რომელიც იწვევს ფოლადის დამკვლევების დაჩქარებას.
- მაგნიტოსადენის წნეხის შესუსტება.
- მაგნიტოგამტარის კოროზია, რაც იწვევს ტრანსფორმატორის ზეთში ტენიანობის გაზრდას.

- პირობითი საჰაერო ღრეჩოს გაზრდა.
- ფოლადის მაგნიტოგამტარის ბუნებრივი დაძველება.

პირობითი საჰაერო ღრეჩოთი იგებენ მაგნიტური წინაღობის ადგილობრივ გაზრდას მაგნიტოგამტარის შეპირაპირების ადგილებში. დანაკარგები შეპირაპირებში ნაკლებადაა დამოკიდებული ფოლადის მარკაზე [5].

ფოლადის პირობით დაძველებას მივყავართ ექსპლუატაციის პროცესში ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარის კუთრი დანაკარგების თანდათანობით გაზრდამდე. დაძველების პროცესში წამყვან ფაქტორად ითვლება მაგნიტოგამტარის ტემპერატურა. გულარის ტემპერატურის არათანაბარი განაწილება დიდი ხნის განმავლობაში განაპირა ღეროებში იწვევს უქმი სვლის დანაკარგების სხვაობის გაზრდას.

საჭიროა ვაკონტროლოთ დამოკიდებულება K_{ac} გამოცდის ჩატარების პროცესში, რადგან მკვეთრი ცვლილება ან სტაბილური გაზრდა (შემცირება) ასიმეტრისაა დაკავშირებულია ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარში მიმდინარე ცვლილებებთან.

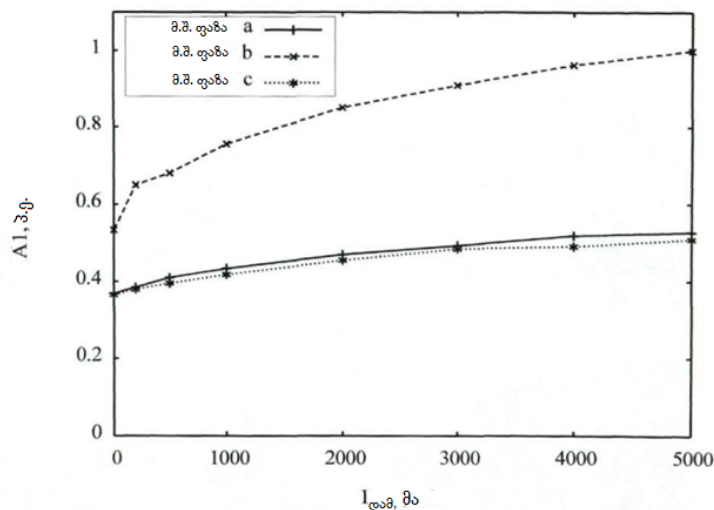
3.6 დიაგნოსტიკური პარამეტრები A_1 და A_2

დაბალი ძაბვის დროს უქმი სვლის დანაკარგების გაზომვის მეთოდის დიაგნოსტიკური შესაძლებლობის გაფართოება შესაძლებელია დანაკარგების ჰისტერეზითა (A_1) და გრიგალური დენებით (A_2) გამოწვეულ მდგენელებად დაშლის გზით. მაგნიტური დანაკარგების მდგენელების მოსაძებნად საჭიროა გადაღებული იქნას ვოლტ-ვატური მახასიათებელი და განსაზღვრული იქნას მისი აპროქსიმაციის A_1 და A_2 კოეფიციენტები.

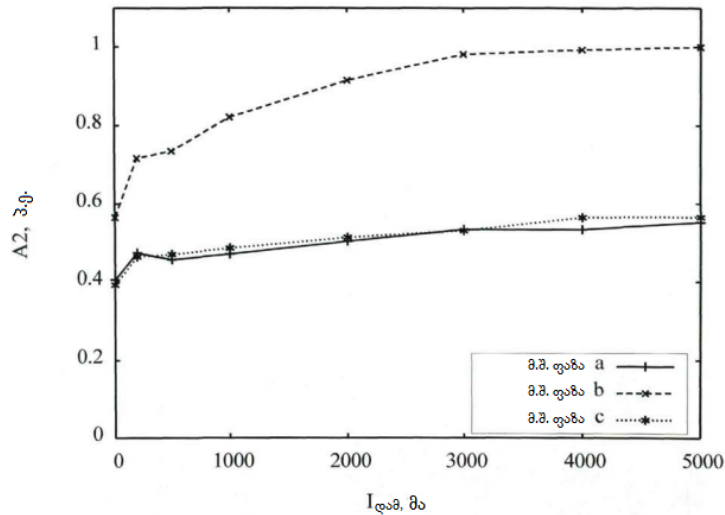
გაზომვების შედეგების მიხედვით მიღებული ვოლტ-ვატური მახასიათებლების ოჯახიდან შეიძლება მივიღოთ მახასიათებლები $A_1 =$

$f(I_{\text{დამ}})$ და $A_2 = f(I_{\text{დამ}})$. ეს მახასიათებლები ასახავენ გრიგალურ დენებზე და ჰისტერეზის დანაკარგების ცვლილებას დამაგნიტების დენის სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს. მაგალითისთვის ნახ. 3.13 და 3.14-ზე ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის წარმოდგენილია მახასიათებელი $A_1 = f(I_{\text{დამ}})$ და $A_2 = f(I_{\text{დამ}})$. უდეფექტო ტრანსფორმატორებში მახასიათებლები $A_1 = f(I_{\text{დამ}})$ და $A_2 = f(I_{\text{დამ}})$ დამოკლებული a და c ფაზების რეჟიმისათვის თანაბარია ან უმნიშვნელოდ განსხვავდება მაგნიტური სისტემის ასიმეტრიისგან. დამოკლებული b ფაზის რეჟიმისათვის $A_1 = f(I_{\text{დამ}})$ და $A_2 = f(I_{\text{დამ}})$ მახასიათებლებს აქვთ მეტი მნიშვნელობები, ვიდრე დამოკლებული a და c ფაზების შემთხვევაში [28].

ფორმირებული დეფექტები გავლენას ახდენენ დანაკარგის მდგენელის სიდიდეებზე. მაგალითად, ხვიათა შერთვის დროს ან გულარის გარემომცველი მოკლედშერთული ბოგირების წარმოქმნისას იცვლება თანაფარდობა დანაკარგის გრიგალურ დენებსა და ჰისტერეზისზე მდგენელებს შორის, ამიტომ დამოკიდებულება A_1/A_2 -თან შეიძლება გამოყენებულ იქნას დიაგნოსტიკისათვის საჭირო ინფორმაციულ პარამეტრებად.



ნახ. 3.13. მახასიათებელი $A_1 = f(I_{\text{დამ}})$ (დანაკარგები ჰისტერეზისზე) ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის დამაგნიტების რეჟიმში

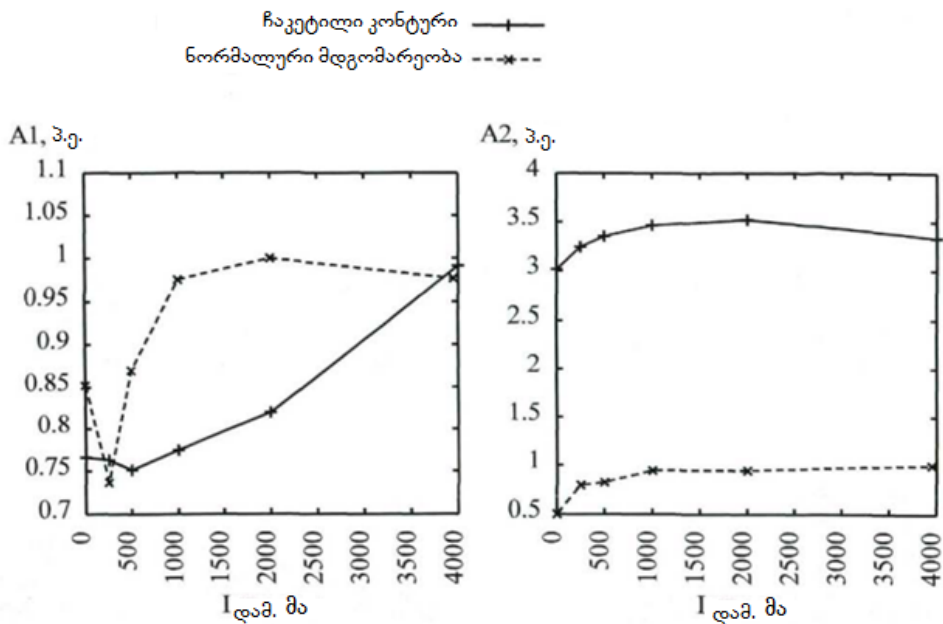


ნახ. 3.14. მახასიათებელი $A_2 = f(I_{დამ})$ (დანაკარგები გრიგალურ დენებზე) ТДН-25000/110 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის დამაგნიტების რეჟიმში

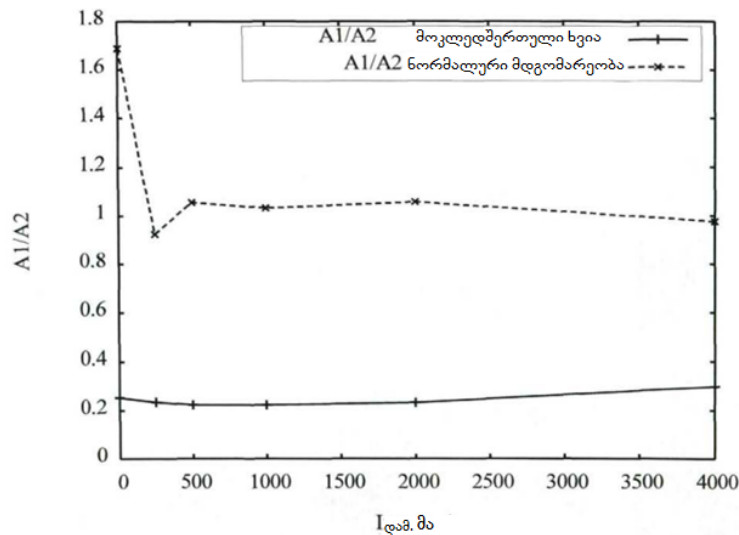
დიაგნოსტიკური პარამეტრი A_1/A_2 ასახავს მაგნიტოგამტარის გულარის მოცულობაში ჰისტერეზისზე და გრიგალურ დენებზე დანაკარგის თანაფარდობას. ერთგვაროვანი გეომეტრიული პარამეტრებისა და თვისებების ფოლადის მქონე მაგნიტოგამტარისათვის შეფარდება A_1/A_2 სხვადასხვა ფაზებისათვის, როგორც წესი, არის თანაბარი. ანალოგიურად, თითოეული ფაზისათვის შეიძლება მივიღოთ A_1/A_2 ფარდობის დამაგნიტების მუდმივ დენზე დამოკიდებულება.

მოკლედშერთული კონტური ქმნის განმამაგნიტებელ ველს მიმართულს ძირითადი ნაკადის საწინააღმდეგოდ. გულარში მაგნიტური ველის ინდუქციის შემცირება ამცირებს ჰისტერეზისზე დანაკარგის წილს, რაც ხასიათდება A_1 კოეფიციენტის შემცირებით. მოკლედშერთულ კონტურში აქტიური დანაკარგები იწვევენ A_2 -ის გაზრდას. შესაბამისად მცირდება დიაგნოსტიკური პარამეტრი A_1/A_2 . მუდმივი მაგნიტური ველით დამაგნიტების შემთხვევაში, მოკლედშერთული კონტურის ინდუქციურობა იცვლება, გრიგალური დენებით გამოწვეული დანაკარგების წილი მნიშვნელოვნად აჭარბებს ჰისტერეზისზე დანაკარგებს. ამ დროს დიაგნოსტიკური პარამეტრს A_1/A_2 ნორმალურ რეჟიმთან შედარებით აქვს არსებითად მცირე მნიშვნელობა. ნახ. 3.15 და 3.16-ზე მოცემულია ТМ –

25000/10 ტიპის ტრანსფორმატორის მოკლედშერთული კონტურის ცდების გზით მიღებულ მდგენელებზე გავლენისა და მათი დამოკიდებულების მაგალითი.



ნახ. 3.15. TM – 25000/10 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის A_1 და გრიგალურ დენებზე (A_2) დანაკარგების ცვლილების დამოკიდებულება დამაგნიტების დენზე ნორმალურ მდგომარეობაში მოკლედ შერთული კონტურის დროს



ნახ. 3.16. მოკლედ შერთული კონტურის გავლენა დიაგნოსტიკების A_1/A_2 პარამეტრზე TM – 25000/10 ტიპის ტრანსფორმატორისათვის დამაგნიტების დენების სხვადასხვა მნიშვნელობებისას

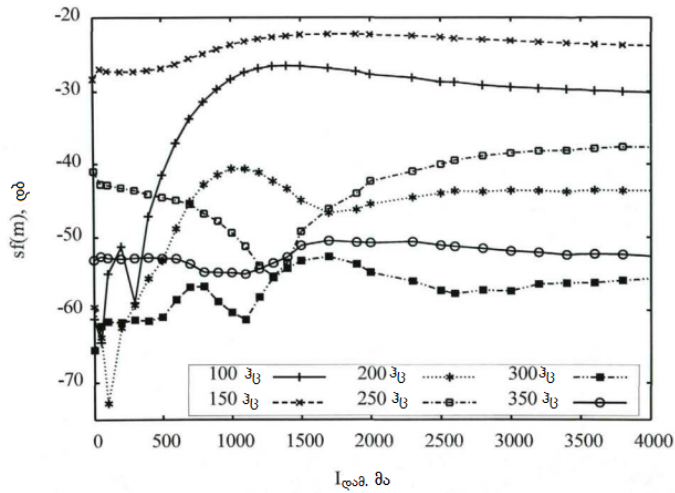
მაგნიტურგამტარის ელექტროტექნიკური ფოლადის ფირფიტების იზოლაციის დარღვევას, ანუ რაც იგივეა "ელექტრომაგნიტური ლინზების" წარმოქმნას, მივყავართ მაგნიტური ველის მაგნიტოგამტარი კვეთში გადანაწილებასთან. მაგნიტური ველი შემჭიდროვდება მაგნიტოგამტარის დაუზიანებელ ნაწილში, სადაც ინდუქციის გაზრდის გამო იზრდება დანაკარგი ჰისტერეზისზე. „ელექტრომაგნიტური ლინზის“ მოცულობაში (ან სივრცეში) შესაბამისად იზრდება კვადრატული დანაკარგები. დიაგნოსტიკური პარამეტრის მნიშვნელობა უმნიშვნელოდ მცირეა ნორმალური რეჟიმის მნიშვნელობასთან შედარებით, ამასთანავე მუდმივი მაგნიტური ველით დამაგნიტების შემთხვევაში მაგნიტოგამტარის მასალის გაჯერებისა და „ელექტრომაგნიტურ ლინზებში“ გრიგალური დენების შემცირების შედეგად შეიმჩნევა დიაგნოსტიკური პარამეტრის A_1/A_2 გაზრდა [29].

ჰისტერეზისა $A_1 = f(I_{\text{დაბ}})$ და გრიგალურ დენებზე $A_2 = f(I_{\text{დაბ}})$ დანაკარგების გაზომილი მახასიათებლები და ასევე მათი დამოკიდებულებები შეიძლება გამოყენებულ იქნას შემდგომი გაზომვების შედეგად მიღებულ მნიშვნელობებთან შესადარებლად. წინა გაზომვების შედეგების არარსებობის შემთხვევაში შესაძლებელია ფაზათა შორის მიღებული მახასიათებლების შედარება. იმ შემთხვევაში, როცა დამაგნიტება გაძნელებულია ან შეუძლებელია, დიაგნოსტიკა შეიძლება მოვახდინოთ A_1 და A_2 პარამეტრების ცვლილების ანალიზის საფუძველზე, რომელსაც მივიღებთ დამაგნიტების გარეშე მიღებული ვოლტ-ვატური მახასიათებლების გაზომვების შედეგების მიხედვით.

3.7 დიაგნოსტიკური პარამეტრი $Sf_{(m)}$

ტრანსფორმატორის გულარის ფოლადის არაწრფივი თვისებები უფრო ძლიერად ვლინდება დამაგნიტების მრუდის მეორე მოღუნვის მიდამოში, ანუ ტრანსფორმატორის გულარებზე უქმი სვლის რეჟიმში ნომინალური ძაბვის მოდების დროს. ტრანსფორმატორის გულარას მუდმივი დენით დამაგნიტების შემთხვევაში მუშა წერტილი შეიძლება გადავიტანოთ დამაგნიტების მრუდის ნებისმიერ წერტილში და ჩავატაროთ უქმი სვლის დენის ჰარმონიული მდგენელის გაზომვა დაბალი ძაბვის დროს. დამაგნიტების მრუდზე გადაადგილებით შეიძლება მივიღოთ $Sf_{(m)}$ მახასიათებელი, რომელიც ასახავს მუდმივი დენით დამაგნიტების დროს უქმი სვლის ჰარმონიკის სიმძლავრის ცვლილებას. უნდა აღინიშნოს, რომ მაგნიტური ველის მუდმივი მდგენელის არსებობის შემთხვევაში უქმი სვლის დენში ჩნდება ლუწი ჰარმონიკები. დამაგნიტების მუდმივი დენის გაზრდის შემთხვევაში იზრდება დამაგნიტებული კონტურის საერთო წინაღობა, ე.ი. იცვლება მისი რეზონანსული მახასიათებელი, რასაც მიყვავართ უქმი სვლის დენის ჰარმონიკის სიმძლავრის გაზრდასთან, ან შემცირებასთან.

$Sf_{(m)}$ მახასიათებლის გაზომვების ჩატარების სქემა ანალოგიურია ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვის ცდისა დამაგნიტების სხვადასხვა დონეზე. განსხვავებას წარმოადგენს ის რომ, მოდებული ცვლადი ძაბვა არ იცვლება, იცვლება მხოლოდ დამაგნიტების მუდმივი დენი. 3.17. ნახ–ზე წარმოდგენილია $Sf_{(m)}$ მახასიათებლის მაგალითი უქმი სვლის დენის სხვადასხვა ჰარმონიკებისათვის.



ნახ. 3.17. ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენის ჰარმონიკის სიმძლავრის მუდმივი დამამაგნიტებელი დენის სიდიდეზე დამოკიდებულება

ძალიან ხშირად გაზომილი სიგნალის ჰარმონიკის სიმძლავრე ნორმირდება ძირითადი ჰარმონიკის (50ჰც სიხშირის) სიმძლავრით. მოცემულ შემთხვევაში ჰარმონიკის სიმძლავრე წარმოადგენს ამ ჰარმონიკის ამპლიტუდის კვადრატში აყვანის ოპერაციას და არ უტოლდება სიმძლავრეს კლასიკური გაგებით. ნორმირებულ სიდიდეებს გააჩნია საკმაოდ მცირე მნიშვნელობები. სიგნალის ჰარმონიკის სიმძლავრის დონის მცირე სხვაობების გასარჩევად უფრო მოხერხებულია მონაცემების შედარება ლოგარითმულ მასშტაბებში [24]. ამგვარად, $Sf(m)$ მახასიათებელი დამაგნიტების დენის განსაზღვრელი მნიშვნელობის დროს განისაზღვრება, როგორც:

$$Sf(m) = 10 \log \left(\frac{I_{XX(m)}^2}{I_{XX(0)}^2} \right) = 20 \log \left(\frac{I_{XX(m)}}{I_{XX(0)}} \right)$$

სადაც $I_{XX(m)}$ – უქმი სვლის დენის m –ური ჰარმონიკის ამპლიტუდაა $I_{XX(0)}$ – ძირითადი ჰარმონიკის (50ჰც) ამპლიტუდა.

გაზომილი მახასიათებლები ასახავენ მაგნიტური სისტემისა და ტრანსფორმატორის გრაგნილის მდგომარეობას. ტრანსფორმატორის ნორმალური მდგომარეობის, ანუ მაგნიტური სისტემისა და გრაგნილების სიმეტრიის დროს, მახასიათებელი $Sf(m)$, რომელიც გადაღებულია a და c ფაზების დამოკლების დროს ერთმანეთის ტოლია, ხოლო ჩაკეტილი b

ფაზის გადაღებისას მიღებულ მახასიათებელს აქვს ანალოგიური სახე, მაგრამ განსხვავდება მაგნიტურ გზების სიგრძეთა სხვაობით გამოწვეულ სიდიდეთა მნიშვნელობებით, ჩაკეტილი b ფაზის, ასევე a და c ფაზების შემთხვევაში.

ტრანსფორმატორის გრაგნილისა ან მაგნიტური სისტემის მდგომარეობის ცვლილებას მივყავართ ფაზათა შორის $Sf(m)$ მახასიათებლების განსხვავებამდე, როგორც თვისებით, ისე რიცხობრივ მნიშვნელობით. დამამაგნიტებელი კონტურის რეზონანსული მახასიათებლის ცვლილება, რომელიც გამოწვეულია დეფექტით, იწვევს არა მხოლოდ ჰარმონიკის სიმძლავრის ცვლილებას, არამედ პირობითი მაქსიმუმების გადაწევას, ანუ ჰარმონიკები აღწევენ მაქსიმალურ მნიშვნელობებს დამამაგნიტების სხვა დენების შემთხვევაში. ლუწი ჰარმონიკის მახასიათებლებში ყველაზე ძლიერად ვლინდება მაგნიტური სისტემის განაპირა ღეროების ასიმეტრია, რადგან მაგნიტოგამტარის ღეროებში ინდუქციის არათანაბარი განაწილებისას დამამაგნიტების დენის მუდმივი მნიშვნელობის დროს სამუშაო წერტილები იმყოფებიან დამამაგნიტების მრუდის სხვადასხვა ადგილებში. ეს იწვევს მნიშვნელოვან განსხვავებას ლუწი ჰარმონიკის სიმძლავრეებში.

ამგვარად, მახასიათებელი $Sf(m)$ შეიძლება გამოვიყენოთ დიაგნოსტიკურ კრიტერიუმად გადახრის შეფასებისათვის, რაც დაკავშირებულია ტრანსფორმატორის გულარას დაძველებასთან და მისი გეომეტრული პარამეტრების ცვლლებასთან. უნდა აღინიშნოს, რომ $Sf(m)$ მახასიათებელი ინდივიდუალურია თითოეული ტრანსფორმატორისათვის.

თავი IV. დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის მათემატიკური მოდელი

მათემატიკური მოდელირება წარმოადგენს ადამიანის მიერ გარე სამყაროს მოვლენების შეცნობის ერთ-ერთ ძირითად ინსტრუმენტს. იგი არის რეალური ობიექტის, პროცესის ან სისტემის შესწავლის საშუალება მათი მათემატიკური მოდელით შეცვლის გზით, რომელიც უფრო მოსახერხებელია გამომთვლელი მანქანის გამოყენებით ექსპერიმენტული კვლევების ჩატარებისას. მათემატიკური მოდელირების ქვეშ იგულისხმება შესასწავლი მოვლენის ძირითადი კანონზომიერებანი და კავშირები. იგი სამეცნიერო-ტექნიკური პროგრესის განუყოფელი ნაწილია. ეს არის მეთოდოლოგია, რომელიც არ ცვლის სამეცნიერო დისციპლინებს, არ უწევს მათ კონკურენციას, მაგრამ მონაწილეობს ყველა სფეროში მიმდინარე შემოქმედებით კვლევებში [30].

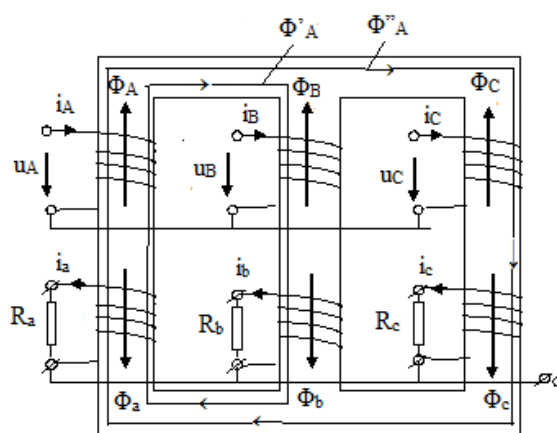
მათემატიკური მოდელის აგება ნიშნავს ამა თუ იმ პროცესსა და მოვლენას შორის კავშირის განსაზღვრას, მათემატიკური აპარატის შექმნას, რომელიც საშუალებას გვაძლევს რაოდენობრივად და ხარისხობრივად გამოვსახოთ კავშირი სპეციალისტისათვის საინტერესო ფიზიკურ სიდიდეებსა და იმ ფაქტორებს შორის, რომლებიც გავლენას ახდენენ საბოლოო შედეგზე.

მათემატიკური მოდელირების წარმატებას განაპირობებს ყველა შემადგენელი რგოლის ერთნაირად ღრმა დამუშავება. ტრიადაზე მოდელი-ალგორითმი-პროგრამა დაყრდნობით მკვლევარს ხელთ აქვს უნივერსალური, მოქნილი და იაფი ინსტრუმენტი, რომელიც თავიდან ყალიბდება საცდელი ამოცანების ნაკრების გადაწყვეტის საფუძველზე.

გასული საუკუნის 60-70 წლები განსაკუთრებით ნაყოფიერი გამოდგა ელექტროტექნიკის თეორიული პრობლემების განვითარების თვალსაზრისით. ელექტრო გამომთვლელი მანქანების განვითარებამ, მათი გამოყენების ეფექტურობის აუცილებელმა ამაღლებამ განსაზღვრა

ელექტრული წრედების თეორიის სფეროში ახალი თეორიული მიდგომების დამუშავება. ელექტრო გამომთვლელი მანქანების უნარმა დაიმახსოვროს რიცხვთა დიდი მასივები, შეასრულოს ლოგიკური ოპერაციები, აიძულა მეცნიერები გადაეხედათ ელექტრული წრედის გაანგარიშების მეთოდებისათვის. წარმოიქმნა იმ მეთოდების განვითარების მოთხოვნა, რომლებიც ყველაზე მეტად გამოიყენებენ ელექტრო გამომთვლელი მანქანების სპეციფიკურ თავისებურებებს. ასეთ მეთოდებს მიეკუთვნება ელექტრული წრედების განტოლებების ფორმირებისა და ამოხსნის მატრიცული მეთოდები. ჩატარებული დიდი მოცულობის სამუშაოს მიუხედავად, ელექტროტექნიკის თეორიული პრობლემების განვითარების თვალსაზრისით უფრო და უფრო აუცილებელი ხდება მიმდინარე პროცესის ფიზიკური მხარის გაგება და ამის საფუძველზე მიღებული შედეგების ჭეშმარიტების შეფასება.

ზუსტი ინფორმაციის გადაცემისა და გარდაქმნის საკითხთან დაკავშირებით, მიზანშეწონილია ელექტრული წრედების თეორიის ზოგიერთი საკითხის გადმოცემის მეთოდულ კადაში გარკვეული ცვლილებების შეტანა. მაგალითად, ასეთ საკითხს მიეკუთვნება ინდუქციურად დაკავშირებული წრედების მათემატიკური მოდელები, რომლის ტიპური მაგალითია ელექტროენერჯის გადაცემის უმნიშვნელოვანესი ელემენტი სამფაზა ტრანსფორმატორი.



ნახ.4.1. დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის მაგნიტური ნაკადის მიმართულებანი

ნახ.4.1-ზე ნაჩვენებია დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის მაგნიტური ნაკადების მიმართულებანი, რომელიც შესაბამის დენტან დაკავშირებულია ბურღის წესით.

სამუშაოს მიზანია დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის ცალსახა მათემატიკური მოდელის შედგენა, რომელიც შეესაბამება ამ ტრანსფორმატორში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს.

როგორც ცნობილია მაგნიტური ნაკადების წირები შეკრული წირებია. თითოეული ფაზის გრაგნილში გამავალი დენის მიერ შექმნილი ძირითადი ნაკადი (ფანტვის ნაკადს სიმცირის გამო მხედველობაში არ ვიღებთ) იყოფა ორ ნაწილად და განჭოლავს დანარჩენი ორი ფაზის გრაგნილების ხვიებს და აღძრავს მათში ურთიერთინდუქციის ელექტრომომოდრავებელ ძალებს. მაგალითად, A ფაზაში გამავალი i_A დენის მიერ შექმნილი ნაკადი Φ_A შედგება ორი ნაწილისაგან და ტოლია:

$$\Phi_A = \Phi'_A + \Phi''_A,$$

ამ ნაკადის ნაწილი Φ'_A განჭოლავს B ფაზის როგორც მაღალი, ისე დაბალი ძაბვის გრაგნილებს და ორივე მათგანში აღძრავს ურთიერთინდუქციის ემძებს, ხოლო Φ''_A განჭოლავს C ფაზის როგორც მაღალი ისე დაბალი ძაბვის გრაგნილებს და ასევე მათშიც აღძრავს ურთიერთინდუქციის ელექტრომომოდრავებელ ძალებს. ანალოგიურად გვექნება დანარჩენ ფაზებში გამავალი i_B და i_C დენების მიერ შექმნილი Φ_B და Φ_C მაგნიტური ნაკადებისათვისაც, რომლებიც შესაბამისად განჭოლავენ A,C და A,B ფაზების მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილებს (ნახაზის გადატვირთვის გამო Φ'_B , Φ''_B , Φ'_C და Φ''_C ნაკადები ნაჩვენები არ არის).

ტრანსფორმატორების განტოლებების შედგენისას ნაშრომში [31] ცალსახად გათვალისწინებულია მხოლოდ ერთსახელა მომჭერები და ტრანსფორმატორის პირველად და მეორეულ გრაგნილებს შორის ურთიერთინდუქციურობის უარყოფითი ნიშანი, მაგრამ გათვალისწინებული არ არის თუ რომელ სისტემაშია ჩაწერილი განტოლებათა სისტემა. ნაშრომში [32,33] დამტკიცებულია, რომ შემხვედრი

შერთების მქონე ინდუქციურად დაკავშირებულ წრედებისათვის განტოლებათა სისტემის შედგენისათვის გათვალისწინებული უნდა იქნეს ერთსახელა მომჭერები, ურთიერთინდუქციის უარყოფითი ნიშანი და სისტემის ყველა განტოლება უნდა ჩაიწეროს რაიმე ერთსა და იმავე ათვის სისტემაში.

აღნიშნულიდან გამომდინარე ნახ.4.1-ზე მოცემული სქემისათვის ვადგენთ განტოლებათა სისტემას კირხჰოფის II კანონის საფუძველზე Φ_A ნაკადის ათვის სისტემაში. თუ გავითვალისწინებთ, რომ მეორეულ გრაგნილში:

$$u_a = i_a R_a ; u_b = i_b R_b ; u_c = i_c R_c \quad (4.1)$$

მაშინ გვექნება:

$$\begin{aligned} u_A &= r_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} - M_{AA} \frac{di_a}{dt} - M_{AB} \frac{di_B}{dt} + M_{Ab} \frac{di_b}{dt} - M_{AC} \frac{di_C}{dt} + M_{Ac} \frac{di_c}{dt} \\ -u_a &= r_a i_a - M_{aA} \frac{di_A}{dt} + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{aB} \frac{di_B}{dt} - M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_C}{dt} - M_{ac} \frac{di_c}{dt} \\ u_B &= r_B i_B - M_{BA} \frac{di_A}{dt} + M_{Ba} \frac{di_a}{dt} + L_B \frac{di_B}{dt} - M_{Bb} \frac{di_b}{dt} - M_{BC} \frac{di_C}{dt} + M_{Bc} \frac{di_c}{dt} \\ -u_b &= r_b i_b + M_{bA} \frac{di_A}{dt} - M_{ba} \frac{di_a}{dt} - M_{bB} \frac{di_B}{dt} + L_b \frac{di_b}{dt} + M_{bc} \frac{di_C}{dt} - M_{bc} \frac{di_c}{dt} \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} u_C &= r_C i_C - M_{CA} \frac{di_A}{dt} + M_{Ca} \frac{di_a}{dt} - M_{CB} \frac{di_B}{dt} + M_{Cb} \frac{di_b}{dt} + L_C \frac{di_C}{dt} - M_{Cc} \frac{di_c}{dt} \\ -u_c &= r_c i_c + M_{cA} \frac{di_A}{dt} - M_{ca} \frac{di_a}{dt} + M_{cB} \frac{di_B}{dt} - M_{cb} \frac{di_b}{dt} - M_{cc} \frac{di_C}{dt} + L_c \frac{di_c}{dt} \end{aligned}$$

(4.1) ის გათვალისწინებით და განტოლებათა სისტემის წევრობრივ დალაგებით (4.2) სისტემა კომპლექსურ სახეში მიიღებს (4.3) სახეს:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= (r_A + j\omega L_A) \dot{I}_A - j\omega M_{AA} \dot{I}_a - j\omega M_{AB} \dot{I}_B + j\omega M_{Ab} \dot{I}_b - j\omega M_{AC} \dot{I}_C + j\omega M_{Ac} \dot{I}_c \\ 0 &= -j\omega M_{aA} \dot{I}_A + (r_a + R_a + j\omega L_a) \dot{I}_a + j\omega M_{aB} \dot{I}_B - j\omega M_{ab} \dot{I}_b + j\omega M_{ac} \dot{I}_C - j\omega M_{ac} \dot{I}_c \\ \dot{U}_B &= -j\omega M_{BA} \dot{I}_A + j\omega M_{Ba} \dot{I}_a + (r_B + j\omega L_B) \dot{I}_B - j\omega M_{Bb} \dot{I}_b - j\omega M_{BC} \dot{I}_C + j\omega M_{Bc} \dot{I}_c \\ (4.3) \\ 0 &= -j\omega M_{bA} \dot{I}_A - j\omega M_{ba} \dot{I}_a - j\omega M_{bB} \dot{I}_B + (r_b + R_b + j\omega L_b) \dot{I}_b + j\omega M_{bc} \dot{I}_C - j\omega M_{bc} \dot{I}_c \\ \dot{U}_C &= -j\omega M_{CA} \dot{I}_A + j\omega M_{Ca} \dot{I}_a - j\omega M_{CB} \dot{I}_B + j\omega M_{Cb} \dot{I}_b + (r_C + j\omega L_C) \dot{I}_C - j\omega M_{Cc} \dot{I}_c \\ 0 &= j\omega M_{cA} \dot{I}_A - j\omega M_{ca} \dot{I}_a + j\omega M_{cB} \dot{I}_B - j\omega M_{cb} \dot{I}_b - j\omega M_{cc} \dot{I}_C + (r_c + R_c + j\omega L_c) \dot{I}_c \end{aligned}$$

მიღებულ განტოლებათა სისტემაში, დატვირთვის წინააღმდეგობასთან შედარებით, მათი ძალიან მცირე მნიშვნელობების გამო შეიძლება უგულვებელყოთ გრაგნილების აქტიური წინააღმდეგობები $r_A, r_B, r_C, r_a, r_b, r_c$, რის შემდეგაც შეიძლება შევადგინოთ Y წინააღმდეგობათა მატრიცა, რომელსაც აქვს ქვემოთ მოყვანილი სახე:

$$\begin{vmatrix} j\omega L_A & -j\omega M_{AA} & -j\omega M_{AB} & j\omega M_{Ab} & -j\omega M_{AC} & j\omega M_{Ac} \\ -j\omega M_{aA} & (R_a + j\omega L_A) & j\omega M_{aB} & -j\omega M_{ab} & j\omega M_{ac} & -j\omega M_{ac} \\ -j\omega M_{BA} & j\omega M_{Ba} & j\omega L_B & -j\omega M_{Bb} & -j\omega M_{BC} & j\omega M_{Bc} \\ j\omega M_{bA} & -j\omega M_{ba} & -j\omega M_{bB} & (R_b + j\omega L_b) & j\omega M_{bc} & -j\omega M_{bc} \\ -j\omega M_{CA} & j\omega M_{ca} & -j\omega M_{CB} & j\omega M_{Cb} & j\omega L_c & -j\omega M_{Cc} \\ j\omega M_{cA} & -j\omega M_{ca} & j\omega M_{cB} & -j\omega M_{cb} & -j\omega M_{Cc} & (R_c + j\omega L_c) \end{vmatrix} \quad (4.4)$$

მოცემულ (4.4) წინააღმდეგობათა მატრიცაში ზოგიერთი კოეფიციენტი ერთმანეთის ტოლია. დავადგინოთ ტოლი კოეფიციენტები და შემოვიტანოთ გამარტივებული აღნიშვნები. ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილების ხვიათა რიცხვები ერთმანეთის ტოლია $W_A = W_B = W_C = W_1$. III-ს მაგვარი გულარის A და C ფაზების მაგნიტური გამტარების საშუალო სიგრძე ერთმანეთის ტოლია $l_A = l_C$, ხოლო l_B განსხვავებულია, ამიტომ ფაზების პირველადი გრაგნილების ინდუქციურობები ტოლია:

$$L_A = L_C = W_1^2 \lambda_1 = W_1^2 \mu \mu_0 \frac{l_1}{S}; \quad L_B = W_2^2 \lambda_2 = W_1^2 \mu \mu_0 \frac{l_2}{S} \quad (4.5)$$

სადაც, μ – მაგნიტოგამტარის ფარდობითი მაგნიტური შეღწევადობაა და მისი მნიშვნელობა აიღება სპეციალური ცხრილებიდან ფოლადის მარკის მიხედვით; μ_0 - ვაკუუმის მაგნიტური შეღწევადობა და ტოლია $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ ჰნ/მ; S – მაგნიტური გამტარის განივკვეთის ფართობია.

ანალოგიურად მეორეული გრაგნილებისათვის გვექნება:

$$L_a = L_c = W_2^2 \lambda_1 = W_2^2 \mu \mu_0 \frac{l_1}{S}; \quad L_b = W_2^2 \lambda_2 = W_2^2 \mu \mu_0 \frac{l_2}{S} \quad (4.6)$$

შეიძლება მივიღოთ, რომ გრაგნილებს შორის კავშირის კოეფიციენტი $K=1$ ამიტომ ურთიერთინდუქციურობები ტოლია:

$$M_{AB} = M_{BA} = M_{BC} = M_{CB} = K\sqrt{L_A L_B} = M_1; \quad M_{AC} = M_{CA} = K\sqrt{L_A L_C} = M_2;$$

$$M_{ab} = M_{ba} = M_{bc} = M_{cb} = K\sqrt{L_a L_{Bb}} = M_3; M_{ca} = M_{ac} = K\sqrt{L_c L_a} = M_4;$$

$$M_{Aa} = M_{aA} = M_{Cc} = M_{cC} = M_{Ac} = M_{cA} = M_{Ca} = M_{aC} = K\sqrt{L_A L_a} = M_5;$$

(4.7)

$$M_{Ab} = M_{bA} = M_{Cb} = M_{bC} = K\sqrt{L_A L_b} = M_6; M_{Bb} = M_{bB} = K\sqrt{L_B L_b} = M_7;$$

$$M_{Ba} = M_{aB} = M_{Bc} = M_{cB} = K\sqrt{L_B L_a} = M_8.$$

თუ ინდუქციურ წინაღობებთან შედარებით უგულვებელყოფთ გრაგნილების ხვიათა აქტიურ წინაღობებს, მაშინ პირველადი გრაგნილების სრული კომპლექსური წინაღობები ტოლია:

$$\underline{Z}_A = j\omega L_A = Z_A e^{j90^\circ}; \underline{Z}_B = j\omega L_B = Z_B e^{j90^\circ}; \underline{Z}_C = j\omega L_C = Z_C e^{j90^\circ},$$

(4.8)

სადაც $Z_A = j\omega L_A$; $Z_B = j\omega L_B$; $Z_C = j\omega L_C$ – არის პირველადი გრაგნილების კომპლექსურ წინაღობათა მოდულები.

ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის მხარის ფაზების სრული კომპლექსური წინაღობებია:

$$\underline{Z}_a = R_a + j\omega L_a = Z_a e^{j\varphi_a}; \underline{Z}_b = R_b + j\omega L_b = Z_b e^{j\varphi_b}; \underline{Z}_c = R_c + j\omega L_c = Z_c e^{j\varphi_c};$$

(4.9)

$$\text{სადაც } Z_a = \sqrt{R_a^2 + (\omega L_a)^2}; Z_b = \sqrt{R_b^2 + (\omega L_b)^2}; Z_c = \sqrt{R_c^2 + (\omega L_c)^2} - \text{არის}$$

ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის მხარის ფაზების სრულ კომპლექსურ წინაღობათა მოდული, ხოლო $\varphi_a = \arctg \frac{\omega L_a}{R_a}$; $\varphi_b = \arctg \frac{\omega L_b}{R_b}$; $\varphi_c = \arctg \frac{\omega L_c}{R_c}$ – არის მათი არგუმენტები.

რადგან სამრეწველო სიხშირე $f = 50$ ჰც, ამიტომ ყველა შემთხვევაში $\omega = 2\pi f = 314$ რადიანი/წმ; ხოლო (4.5), (4.6), (4.7) და (4.8)-ის გათვალისწინებით (4.4) წინაღობების მატრიცა მიიღებს სახეს:

$$\left\| \begin{array}{cccccc} \underline{Z}_A & -j\omega M_5 & -j\omega M_1 & j\omega M_6 & -j\omega M_2 & j\omega M_5 \\ -j\omega M_5 & \underline{Z}_a & j\omega M_8 & -j\omega M_3 & j\omega M_5 & -j\omega M_4 \\ -j\omega M_1 & j\omega M_6 & \underline{Z}_B & -j\omega M_7 & -j\omega M_1 & j\omega M_8 \\ j\omega M_6 & -j\omega M_3 & -j\omega M_7 & \underline{Z}_b & j\omega M_6 & -j\omega M_3 \\ -j\omega M_2 & j\omega M_5 & -j\omega M_1 & j\omega M_6 & \underline{Z}_C & -j\omega M_5 \\ j\omega M_5 & -j\omega M_4 & j\omega M_8 & -j\omega M_3 & -j\omega M_5 & \underline{Z}_c \end{array} \right\| \quad (4.10)$$

(4.10) წინაღობათა მატრიცა წარმოადგენს (3) სისტემის მთავარ განმსაზღვრელს, ანუ

$$\Delta = \begin{vmatrix} \dot{I}_A & \dot{I}_a & \dot{I}_B & \dot{I}_b & \dot{I}_C & \dot{I}_c \\ \underline{Z}_A & -j\omega M_5 & -j\omega M_1 & j\omega M_6 & -j\omega M_2 & j\omega M_5 \\ -j\omega M_5 & \underline{Z}_a & j\omega M_8 & -j\omega M_3 & j\omega M_5 & -j\omega M_4 \\ -j\omega M_1 & j\omega M_6 & \underline{Z}_B & -j\omega M_7 & -j\omega M_1 & j\omega M_8 \\ j\omega M_6 & -j\omega M_3 & -j\omega M_7 & \underline{Z}_b & j\omega M_6 & -j\omega M_3 \\ -j\omega M_2 & j\omega M_5 & -j\omega M_1 & j\omega M_6 & \underline{Z}_C & -j\omega M_5 \\ j\omega M_5 & -j\omega M_4 & j\omega M_8 & -j\omega M_3 & j\omega M_6 & \underline{Z}_c \end{vmatrix} \quad (4.11)$$

(4.11) სისტემაში თითოეული საძიებელი დენის ქვეშ მოთავსებულია მათი კოეფიციენტები. გარდა მთავარი დეტერმინანტისა (Δ) დენების განსაზღვრისათვის გვესაჭიროება დამატებითი განმსაზღვრელები. დამატებითი განმსაზღვრელის მისაღებად დენების ქვეშ მოთავსებული კოეფიციენტები უნდა შეიცვალოს (4.3) სისტემის მარცხენა ნაწილში არსებული თავისუფალი წევრებით. მაგალითად \dot{I}_A დენის დამატებითი განმსაზღვრელი განისაზღვრება (4.12) მატრიცით.

$$\Delta \dot{I}_A = \begin{vmatrix} \dot{U}_A & -j\omega M_5 & -j\omega M_1 & j\omega M_6 & -j\omega M_2 & j\omega M_5 \\ 0 & \underline{Z}_a & j\omega M_8 & -j\omega M_3 & j\omega M_5 & -j\omega M_4 \\ \dot{U}_B & j\omega M_6 & \underline{Z}_B & -j\omega M_7 & -j\omega M_1 & j\omega M_8 \\ 0 & -j\omega M_3 & -j\omega M_7 & \underline{Z}_b & j\omega M_6 & -j\omega M_3 \\ \dot{U}_C & j\omega M_5 & -j\omega M_1 & j\omega M_6 & \underline{Z}_C & -j\omega M_5 \\ 0 & -j\omega M_4 & j\omega M_8 & -j\omega M_3 & j\omega M_6 & \underline{Z}_c \end{vmatrix} \quad (4.12)$$

საძიებელი \dot{I}_A დენი განისაზღვრება ფორმულით:

$$\dot{I}_A = \Delta \dot{I}_A / \Delta \quad (4.13)$$

ანალოგიურად განისაზღვრება დანარჩენი დენებიც:

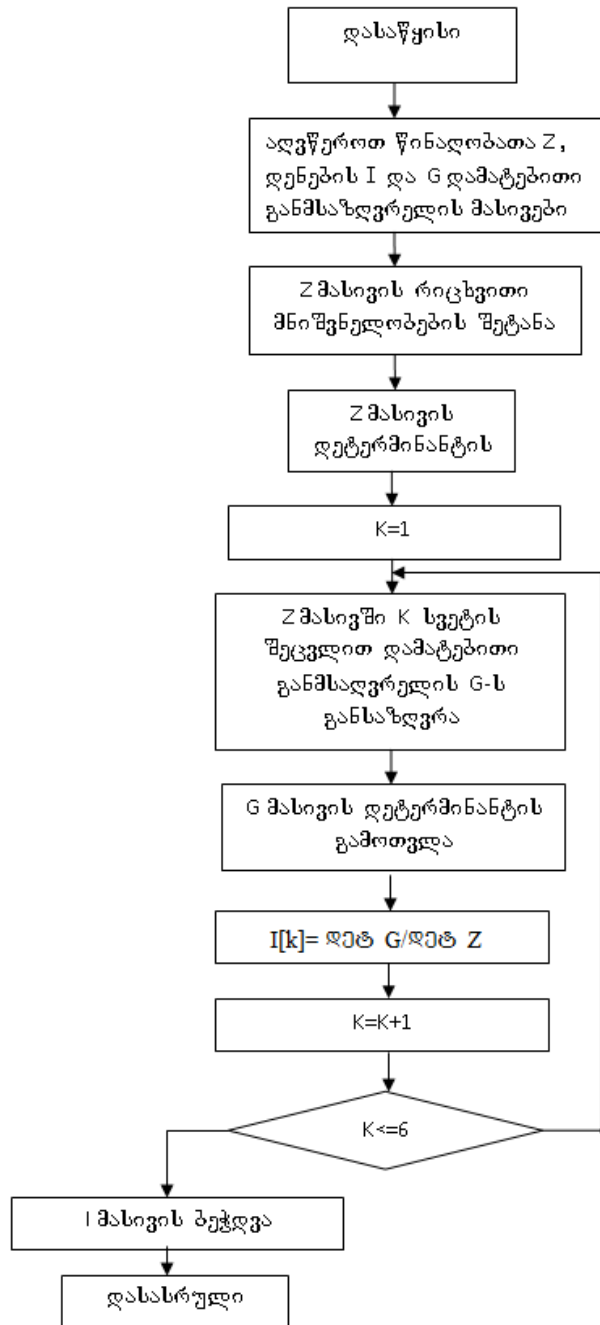
$$\dot{I}_a = \Delta \dot{I}_a / \Delta ; \dot{I}_B = \Delta \dot{I}_B / \Delta ; \dot{I}_b = \Delta \dot{I}_b / \Delta ; \dot{I}_C = \Delta \dot{I}_C / \Delta ; \dot{I}_c = \Delta \dot{I}_c / \Delta \quad (4.14)$$

ამრიგად, წრფივი ელექტრული წრედების თეორიის საფუძველზე ერთსახელა მომჭერების თვისებისა და პირველად და მეორეულ გრაგნილებს შორის ურთიერთინდუქციის ნიშნის ცალსახად გათვალისწინებით, წინასწარ არჩეულ ათვლის სისტემაში დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორისათვის შედგენილი იქნა მათემატიკური

მოდელი დენების საანგარიშოდ, რომელიც ცალსახად და ზუსტად აღწერს დატვირთულ სამფაზა ტრანსფორმატორში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს. მიღებული მათემატიკური მოდელი იძლევა საშუალებას შედგენილი იქნას ალგორითმი კომპიუტერული პროგრამების დამუშავებისათვის.

4.1. დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის რეალური განტოლებათა სისტემის ამოხსნის ბლოკ-სქემა

ნახ.4.2-ზე მოცემულია დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის განტოლებათა სისტემის ამოხსნის ბლოკ-სქემა, სადაც საძიებელი სიდიდეებია ტრანსფორმატორის გრაგნილებში გამავალი დენები: (4.13) და (4.14)



ნახ. 4.2. სამფაზა ტრანსფორმატორის განტოლებათა სისტემის ამოხსნის ბლოკ-სქემა

4.2. ძალურ ტრანსფორმატორში განვითარებადი დეფექტების განსაზღვრის ალგორითმი

ძალური ტრანსფორმატორის დაძველების პროცესში მისი იზოლაცია განიცდის მთელ რიგ ფიზიკო - ქიმიურ ცვლილებებს. ამ დროს გამოიყოფა

დაშლის პროდუქტები–მყარი, თხევადი და აირისებრი ნივთიერებები. ცელულოზისაგან დამზადებული მყარი საიზოლაციო მასალები (ქალაქი და მუყაო) ნელი დაძველების დროს გამოყოფენ აირებს; მათ რიცხვშია წყალბადი და დაბალმოლეკულური ნახშირწყალბადები, ასევე ნახშირბადის ჟანგი და ორჟანგი, რომლებიც წარმოიქმნებიან ცელულოზის დაჟანგვისას. აირები წარმოიშვება ასევე ზეთის დაძველებისას. ამასთანავე აირის გამოყოფის ინტენსივობა დამოკიდებულია ელექტრული ველის დაძაბულობასა და ზეთის ქიმიურ შემადგენლობაზე; ობიექტის მუშაობის რეჟიმზე; ექსპლუატაციის ხანგრძლივობაზე; გამოყენებულ მასალებზე და მთელ რიგ ფაქტორებზე, რომელთა გათვალისწინებაც ყოველთვის ადვილი არ არის გამოყოფილი აირების რიცხვში გარდა ნახშირის ჟანგისა CO და ორჟანგისა CO₂, გვაქვს ასევე წყალბადი HO₂, მეთანი CH₄, ეთანი C₂H₆, ეთილენი C₂H₄ და აცეტილენი C₂H₂ [34].

აირების ზეთში ხსნადობა პროპორციულია გარეშე წნევისა და 20-100⁰C ტემპერატურის დიაპაზონში ტემპერატურის წრფივი ფუნქციაა. მაგალითად, წყალბადისათვის ზეთში ხსნადობა მოცულობაში 7 %-ია, აზოტისა -8,6%, ჰაერისა- 10,3 %, მეთანია -30 %, აცეტილენისა – 400 % და ა.შ.

იზოლაციის დარღვევის დროს, რომელიც დაკავშირებულია დაზიანების არსებობასთან აირების გამოყოფის ინტენსივობის პროცესი მკვეთრად იზრდება; ასევე შეიძლება შეიცვალოს აირების შემადგენლობა და მათი თანაფარდობა.

დადგენილია, რომ ტრანსფორმატორის დეფექტის თითოეულ სახეს შეესაბამება აირების განსაზღვრული ნაკრები და მათი თანაფარდობა.

განვითარებადი დეფექტების შესახებ ცოდნის ბაზა შეიცავს მრავალ წესს, რომელთაგან თითოეული ხასიათდება ნდობის კოეფიციენტით. ცოდნის ბაზის საფუძველს შეადგენს რეკომენდაციები.

წესების ნდობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია მასში შემავალი პარამეტრების განსაზღვრულობაზე. თუ ერთი ან რამდენიმე პარამეტრი

განსაზღვრული არ არის, მაშინ წესების ნდობის კოეფიციენტი მცირდება, რაც აისახება ამ წესების გავლენით საბოლოო შედეგზე.

მაგალითად, ინფორმაციის მთლიანი მოცულობა სისტემაში მიეწოდება მაშინ, როცა ცნობილია ყველა აირის კონცენტრაციები. ამასთანავე ნებისმიერი აირის რიცხვითი მნიშვნელობების გვერდით შესაძლებელია არსებობდეს შემდეგი შემთხვევები:

- აირი საერთოდ არ არსებობს;
- არის აირის მცირე რაოდენობა (კვალი);
- აირის არსებობა ან არ არსებობა განსაზღვრული არ არის.

უკანასკნელი შემთხვევა არის იმ წესის ნდობის კოეფიციენტის ცვლილების მიზეზი, რომელშიც შედის შესაბამისი აირი.

დამუშავებული ალგორითმი იძლევა საშუალებას მივიღოთ დიაგნოზი იმ შემთხვევაშიც კი, როცა ერთი აირი მაინც ნამდვილად არის დაფიქსირებული, ხოლო დანარჩენების მიმართ არ გვაქვს მკაფიო ინფორმაცია. ბუნებრივია, რომ ამ შემთხვევებში ფაქტიური და პროგნოზირებადი დეფექტების თანხვედრის ალბათობა მცირდება.

ტრანსფორმატორის დიაგნოსტიკის პროცესში რამდენიმე გაზომვის არსებობისას მიმდევრობით ჩაირთვება ახალი წესები და ხდება დეფექტების თანდათანობითი დაზუსტება. მიღებულია, რომ ტრანსფორმატორს ერთი აირის კონცენტრაციის ზღვრული დასაშვები მნიშვნელობის გადამეტების დროსაც კი გააჩნია დეფექტი.

თითოეული ტრანსფორმატორი დეფექტის შემჩნევის დროს დგება კონტროლის ქვეშ. სიტუაციის დაზუსტების მიზნით ხუთი დღის შემდეგ ტარდება განმეორებითი ანალიზი. მორიგი ანალიზის დადებითი შედეგის (არ არის დეფექტი) შემთხვევაში დაფიქსირდება ტრანსფორმატორში მიმდინარე პროცესების ნორმალიზაცია და ტრანსფორმატორი ავტომატურად მოიხსნება კონტროლიდან.

დეფექტის პროგნოზირებასთან ერთად ფორმირდება ტრანსფორმატორის ტექნიკური მომსახურეობის შემდგომი ღონისძიებები.

ამ დროს დაწვრილებით ანალიზდება დეფექტის განვითარების ტექნოლოგია, რომელიც ხასიათდება ნიშნებით 0 ან 1.

მაგალითისათვის, განვიხილოთ დეფექტის განვითარების ტექნოლოგია ტრანსფორმატორში აირების ზღვრული კონცენტრაციის ანალიზის შემთხვევისათვის.

1. ტრანსფორმატორში ანალიზის მომენტში დეფექტების არსებობის აღმრიცხველი ავღნიშნოთ P1-ით. (თუ ტრანსფორმატორში ადგილი აქვს ზეთის ზღვრული კონცენტრაციის გადამეტებას, მაშინ იგი ტოლია 0, ხოლო თუ არა –1);
2. ერთი აირის მაინც კონცენტრაციის ზრდის სიჩქარე თვეში 10 %-ზე მეტია - P2 (0 - ზრდა ნაკლებია 10 %-ზე, 1- ზრდა მეტია 10 %-ზე);
3. მოცემულ ტრანსფორმატორში ზედიზედ დეფექტების შემჩნევის რაოდენობა - P3 (0- შემჩნეული დეფექტების რაოდენობა ნაკლებია ან ტოლი 2-ზე, 1- მეტია 2-ზე);
4. ერთი აირის მაინც კონცენტრაციის თვეში ზრდის სიჩქარის 10 %-ზე მეტი ზრდის ზედიზედ შემთხვევების რაოდენობა - P4 (0- კონცენტრაციის ზრდის სიჩქარე შემჩნეულია ნაკლები ან ტოლი 2-ზე, 1- მეტი 2-ზე);
5. აირების ზრდის დაჩქარება - P5 (0 - პროგრესირებადი ზრდის რაოდენობა ყოველი შემდგომი გაზომვისას ნაკლებია ან ტოლი 1-ზე, 1- მეტია 1-ზე);
6. ფაქტორების არსებობა, რომლებიც ხელს უწყობენ აირების კონცენტრაციის გარდას -PP6 (0- ფაქტორებს აქვს ადგილი, 1- ფაქტორები არ არის);
7. ფაქტორების არსებობა, რომლებიც ხელს უწყობენ აირების კონცენტრაციის შემცირებას -PP7 (0- ფაქტორებს აქვს ადგილი, 1- ფაქტორები არ არის);
8. ზეთის უკანასკნელ სინჯში აცეტილენის ძირითადი აირის სახით არსებობა - P8 (0- არ არის ძირითადი აირი, 1- არის ძირითადი აირი);

9. ზეთის უკანასკნელ სინჯში ნახშირბადის ჟანგისა და ორჟანგის ძირითადი აირის სახით არსებობა -P9 (0- სინჯში ეს აირები არ არის, 1- სინჯში არის ერთი აირი მაინც);

მაგალითი. ჩავატარეთ ТРДН-25000/110 ძალოვანი ტრანსფორმატორის დიაგნოსტიკური ანალიზი ცხრილი 4.1-ში მოყვანილი ზეთის ერთეულოვან მოცულობაში აირების კონცენტრაციის მნიშვნელობები წინა და უკანასკნელი გაზომვების შედეგების მიხედვით.

ანალიზი ჩატარებულია მეორეჯერ, დეფექტის პირველი შემჩნევიდან ერთი თვის შემდეგ.

ცხრილი 4.1. ზეთის ერთეულოვან მოცულობაში აირების კონცენტრაციის მნიშვნელობები

თარიღი	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
01.03.2011	0.002	0.01	0.001	0.02	0.7	განუსაზღ.	0.4
01.04.2011	0.003	0.02	0.02	0.05	განუსაზღ.	განუსაზღ.	0.5

პირველ რიგში უნდა განვსაზღვროთ აირების ზღურბლური, ზღვრული, ფარდობითი კონცენტრაციისა და კონცენტრაციის ცვლილების აბსოლუტური და ფარდობითი სიჩქარეები. ყველა ეს პარამეტრი განსაზღვრულია ნორმებითა და ფორმულებით. ლიტერატურა [34] - ის მიხედვით მათი მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილი 4.2 -ში.

ცხრილი 4.2. ნორმებით განსაზღვრული პარამეტრები

პარამეტრი	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
ზღურბლური კონცენტრაც.	0.0005	0.0005	0.00005	0.0005	0.0005	0.005	0.005
ზღვრული კონცენტრაც.	0.01	0.01	0.001	0.01	0.005	0.02	0.3
ფარდობითი კონცენტრაცია	0.3	2	19.9	5	განუსაზღ.	განუსაზღ.	1.67
კონცენტრაციის ცვლილების აბსოლუტური სიჩქარე	0,010	0.1071	0.2036	0.321	განუსაზღ.	განუსაზღ.	0.107

კონცენტრაციის ცვლილების ფარდობითი სიჩქარე	53.57 1	107.14 3	2035.7	160.7 1	განუსაზ	განუსაზ	26.7 8
---	------------	-------------	--------	------------	---------	---------	-----------

ცხრილი 4.2-ის ონაცემების საფუძველზე ფარდობითი კონცენტრაციის მნიშვნელობების მიხედვით ხდება აირის კონცენტრაციის ხასიათის განსაზღვრა. როგორც ამ ცხრილის ფარდობითი კონცენტრაციის სტრიქონიდან ჩანს: H₂ - არის მახასიათებელი აირი მცირე შემცველობით; CH₄ და C₂H₄ – არიან მახასიათებელი აირები მაღალი შემცველობით; C₂H₂ და CO₂ – ძირითადი აირებია; C₂H₆ და CO აირები არ არსებობენ.

როგორც ცხრილი 4.2 -დან ჩანს ოთხი აირის (CH₄, C₂H₂, C₂H₄, CO₂) ფარდობითი კონცენტრაციის მნიშვნელობები აღემატება ზღვრულ მნიშვნელობებს. ამ დროს მიმდინარეობს ყველა აირის კონცენტრაციის ზრდა 10%-ზე მეტი აბსოლუტური სიჩქარით. მაშასადამე, სახეზეა განვითარებადი დეფექტის არსებობა. განვითარებადი დეფექტის არსებობის შემდეგ შემუშავებული უნდა იქნეს რეკომენდაციათა კრებული. ერთი მხრივ დეფექტის დამახასიათებელ ნიშნებსა და მისი განვითარების პროცესს, ხოლო მეორეს მხრივ დეფექტის გამოვლენის დაზუსტებისა და შედეგების ლოკალიზაციის რეკომენდაციების ნაკრებს შორის არსებობს გარკვეული კავშირი, რომელიც მოყვანილია ცხრილი 4.3 -ში.

ცხრილი 4.3. კავშირი ნიშანთა ნაკრებსა და რეკომენდაციების ნაკრებს შორის

ნიშანთა ნაკრები									რეკომენდაციების ნაკრები					
P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	18	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	11	14	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	1	1	3	9	14	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	1	0	0	3	10	15	18	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	0	5	6	7	9	14	0
1	0	1	1	0	1	0	0	0	3	4	9	0	0	0

1	1	1	1	0	0	0	0	0	3	9	15	0	0	0
1	1	1	1	0	0	1	0	1	2	3	15	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	1	0	2	3	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	1	2	3	19	0	0	0
1	1	0	0	0	0	1	1	0	2	3	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	3	10	9	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	1	1	2	3	10	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	3	18	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	1	3	9	14	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	1	1	2	15	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	3	14	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	1	2	15	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	3	9	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	1	1	3	10	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	1	1	2	15	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	1	0	3	9	14	0	0	0
1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	1	0	1	3	14	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	1	0	1	3	14	0	0	0	0
<u>1</u>	<u>1</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
1	1	1	0	1	1	1	0	1	2	15	0	0	0	0

დეფექტის განვითარების თითოეული სიტუაცია ერთმნიშვნელოვნად განსაზღვრავს ნიშნების სიას. ჩვენს მიერ მოყვანილ მაგალითში:

- ადგილი აქვს ზღვრული კონცენტრაციის გადაჭარბებას, მაშასადამე $P1=1$.
- აირების კონცენტრაციის ზრდის სიჩქარე მეტია 10 %-ზე, მაშასადამე $P2=1$.
- შემჩნეული დეფექტების რაოდენობა ტოლია 2, მაშასადამე $P3=0$.
- სიჩქარის 10 %-ზე მეტად გადაჭარბების რაოდენობა ტოლია 1, მაშასადამე $P4=0$.
- ნიმუშში პირველად იქნა დაფიქსირებული აირების ზრდის მაქსიმალური სიჩქარე, მაშასადამე $P5= 0$.

- არ ჩატარებულა ისეთი ღონისძიებანი, რომლებიც ხელს უწყობდნენ აირების კონცენტრაციის ზრდას, მაშასადამე P6 =1.
- არ ჩატარებულა ისეთი ღონისძიებანი, რომლებიც ხელს უწყობდნენ აირების კონცენტრაციის შეცირებას, მაშასადამე P7 =1.
- აცეტილენი ნიმუშში ძირითადი აირია, მაშასადამე P8 =1.
- N ნიმუშში ადგილი აქვს CO ან CO2, მაშასადამე P9 =1.

მიღებული ნიშნების სიას ცხრილი 4.3-ში შეესაბამება ქვემოდან მეორე სტრიქონი, რომლის გასწვრივ მოცემულია საჭირო ღონისძიებების ნომრები #2 და #3. ამ ნომრების მიხედვით ზეთში გახსნილი აირების შედეგების საფუძველზე კონკრეტული გამოცდების პრიორიტეტულ ჩატარებაზე რეკომენდაციები მოცემულია ცხრილი 4.4-ში. ამ ცხრილიდან აირჩევა ჩასატარებელი ღონისძიებები: ტრანსფორმატორების დაგეგმილი გამოყვანა მუშაობიდან (#2) და ჩატარდეს ზეთში გახსნილი აირების გახშირებული ანალიზი (#3).

რეკომენდაციები კონკრეტული გამოცდების პრიორიტეტულ ჩატარებაზე ზეთში გახსნილი აირების შედეგების საფუძველზე მოცემულია ცხრილში 4.4.

ცხრილი 4.4. ზეთში გახსნილი აირების შედეგების საფუძველზე კონკრეტული გამოცდების პრიორიტეტულ ჩატარებაზე რეკომენდაციები

#	რეკომენდაციები
1	ტრანსფორმატორების დაუყონებლივ გამოყვანა მუშაობიდან
2	<i>ტრანსფორმატორების დაგეგმილი გამოყვანა მუშაობიდან</i>
3	<i>ჩატარდეს ზეთში გახსნილი აირების გახშირებული ანალიზი</i>
4	შევამოწმოთ სორბენტის მდგომარეობა ჰაერსაშრობში
5	შევამოწმოთ ზეთის ტუმბოს მდგომარეობა
6	შევამოწმოთ გადადინების შესაძლებლობა (ერთდროულად ავილოთ ზეთის სინჯები ტრანსფორმატორისა და გადამრთველის ავზებიდან)
7	ჩავატაროთ ზეთის დეგაზაცია
8	საქმის კურსში ჩავაყენოთ დაწესებულების ქვედანაყოფი

9	გავანალიზოთ წინა ექსპლუატაციის პირობები
10	მოვხსნათ ზეთში გახსნილი აირების გახშირებული ანალიზის კონტროლი
11	ჩავატაროთ ზეთში გახსნილი აირების ანალიზის კონტროლი ჩვეულებრივი პერიოდულობით
12	შევადაროთ მსგავსი ტრანსფორმატორების კონცენტრაციებს
13	შევატყობინოთ ქარხანა-დამამზადებელს
14	ტრანსფორმატორი დავაყენოთ კონტროლის ქვეშ
15	გავზომოთ გრაგნილების ომური წინაღობა
16	ჩავატაროთ ანალიზი ინფრაწითელი ტექნიკის გამოყენებით
17	გავზომოთ უქმი სვლის დანაკარგები
18	ჩავატაროთ ზეთის ქიმიური ანალიზი
19	გავზომოთ tგდ და იზოლაციის კომპლექსური გამტარობა
20	გავზომოთ მოკლედ შერთვის წინაღობა
21	გავზომოთ ზეთის tგდ
22	ვაწარმოთ ნაწილობრივი განმუხტვის ელექტრული გაზომვები
23	ვაწარმოთ ნაწილობრივი განმუხტვის აკუსტიკური გაზომვები
24	გავზომოთ იზოლაციის წინაღობა
25	გავზომოთ იზოლაციის წინაღობა
26	ჩავატაროთ ვიზუალური კონტროლი
27	ავილოთ ზეთის სინჯები კონტაქტორისა და ტრანსფორმატორის ავზეზებიდან

ზეთში გახსნილი აირების ანალიზი დეფექტის სახის შესახებ ვერ იძლევა სრულ გარანტიას და პრაქტიკულად ვერ წარმოადგენს ინფორმაციას მისი ადგილმდებარეობის შესახებ, ამიტომ საჭიროა ჩატარდეს სხვა გამოცდებიც. კერძოდ, უნდა განისაზღვროს აირების კონცენტრაციის მახასიათებელი ფარდობა. ამ მახასიათებლის განსაზღვრა ხდება ცხრილი 4.2-ის ფარდობითი კონცენტრაციის სტრიქონის მონაცემების მიხედვით.

$$D1 = 0,4 \text{ წარმოადგენს ფარდობას } (CH_4/C_2H_4 = 2/5);$$

$$D2 = 6,66667 \text{ წარმოადგენს ფარდობას } (CH_4/H_2 = 2/0,3);$$

D3 = განუსაზღვრელია წარმოადგენს ფარდობას (C_2H_4/C_2H_6);

D4 = განუსაზღვრელია წარმოადგენს ფარდობას (CO_2/CO).

ნიმუშში აირების არსებობისას მათი კონცენტრაციისა და ზრდის სიჩქარის მნიშვნელობის, ასევე კონცენტრაციის ფარდობითი მახასიათებლების ანალიზის დროს კონცენტრაციის მახასიათებელი ფარდობის უდიდესი მთელი რიცხვია 6. ზუსტი დიაგნოზის განსაზღვრისათვის ამ ნომრის მიხედვით წინასწარი დეფექტების ცხრილი 4.5 -დან პოულობენ მის დასახელებას: დაბალი ტემპერატურის თერმული დეფექტი. ამის შემდეგ მოიყვანება მიზეზები, რომელთა შედეგია პროგნოზირებადი დეფექტი:

- მილებისა და მილთაშორისი სივრცის გაჭუჭყიანება;
- გამაციებული მილების დაბინძურება.

ამის შემდეგ დგება გამოცდის ოქმი.

დეფექტების განმეორებით შემჩნევის შემთხვევაში ისმება წინასწარი დიაგნოზი ცხრილი 4.5 -ში მოცემული ნაკრებიდან.

ცხრილი 4.5. დეფექტების სახეები

#	დეფექტის სახე
1	ზეთის დაძველება
2	ნაწილობრივი განმუხტვები ენერჯის დაბალი სიმკვრივით
3	ნაწილობრივი განმუხტვები ენერჯის მაღალი სიმკვრივით
4	მცირე სიმძლავრის განმუხტვები
5	დიდი სიმძლავრის განმუხტვები
6	დაბალი ტემპერატურის თერმული ეფექტი
7	დაბალი ტემპერატურის დიაპაზონში თერმული ეფექტი
8	საშუალო ტემპერატურის დიაპაზონში თერმული ეფექტი
9	მაღალი ტემპერატურის თერმული ეფექტი

შემდგომში დეფექტის ხასიათი ზუსტდება ცხრილი 4.6-ს მონაცემებით, თუ რამ შეიძლება გამოიწვიოს აღნიშნული დეფექტი.

ცხრილი 4.6 დაზუსტებული დეფექტების სახეები

#	დეფექტის სახე
1	დენგამტარი ნაწილების ან ჩონჩხის კონტრუქციის ელემენტების გადახურება
2	ჩონჩხის კონტრუქციის ელემენტების გადახურება
3	მყარი იზოლაციის გადახურება
4	ელექტრული განმუხტვები მყარ იზოლაციაში
5	ნაწილობრივი განმუხტვები ზეთში
6	ნაპერწყლური და რკალური განმუხტვები ზეთში
7	დეფექტი გაციების სისტემაში
8	ზეთის დაძველება
9	დეფექტი გადამრთველ მოწყობილობაში

ამრიგად ძალური ტრანსფორმატორში განვითარებადი დეფექტის დადგენის მიზნით შემუშავებული იქნა სპეციალური ალგორითმი, რომელიც საშუალებას იძლევა საკმაო სიზუსტით განვსაზღვროთ განვითარებადი დეფექტის სახე, მისი გამომწვევი მიზეზი და მოსალოდნელი შედეგი.

4.3. ძალური ტრანსფორმატორების საიმედოობის მაჩვენებლების ანგარიში

ძალური ტრანსფორმატორები წარმოადგენენ ელექტრული ქსელებისა და სისტემების ძირითად ელემენტებს, რომლებიც განსაზღვრავენ მათი ფუნქციონირების საიმედოობასა და ეკონომიურობას. ექსპერიმენტული დამუშავების, გამოცდისა და ექსპლუატაციის სტადიაზე, როგორც წესი, მათი მუშაობის საიმედოობის მაჩვენებლების როლს ასრულებენ შესაბამისი ალბათობითი მახასიათებლების სტატისტიკური შეფასებები. საიმედოობის ყველა მახასიათებელი განისაზღვრება, როგორც ალბათობითი მახასიათებლები.

ძალური ტრანსფორმატორების შეუფერხებელი მუშაობის საიმედოობა შეფერხებებზე სტატისტიკური მონაცემებით მიხედვით ფასდება გამოსახულებით [35]:

$$p(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (4.15)$$

სადაც $n(t)$ - დროის t მომენტისათვის შეუფერხებელად მომუშავე ტრანსფორმატორების რაოდენობაა, ხოლო N -გამოცდაზე დაყენებული ტრანსფორმატორების რაოდენობა, $P(t)$ -შეუფერხებელად მომუშავე ტრანსფორმატორების სტატისტიკური შეფასების ალბათობა.

სტატისტიკური მონაცემებით შეფერხების ალბათობისათვის სამართლიანია ფარდობა:

$$q(t) = \frac{N-n(t)}{N}, \quad (4.16)$$

სადაც $N - n(t)$ - იმ ტრანსფორმატორების რაოდენობაა, რომლებიც შეფერხდნენ დროის t მომენტისათვის;

$q(t)$ - ნაკეთობის შეუფერხების ალბათობის სტატისტიკური შეფასება.

შეფერხებებზე სტატისტიკური მონაცემებით შეუფერხებების სიხშირე გამოისახება ფორმულით:

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (4.17)$$

სადაც $n(t)$ -არის $(t + \Delta t)$ დროის მონაკვეთზე შეუფერხებული მუშაობის რაოდენობა;

Δt -დროის ინტერვალი, $f(t)$ -შეფერხების სიხშირის სტატისტიკური შეფასება.

შეფერხებებზე სტატისტიკური მონაცემებით შეფერხებების ინტენსივობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot n(t)}, \quad (4.18)$$

სადაც $\Delta n(t)$ - იმ ტრანსფორმატორების რაოდენობა, რომლებსაც შეფერხება არ აქვთ t მომენტისათვის;

$n(t)$ - შეფერხებული ნაკეთობების რიცხვი $(t + \Delta t)$ დროის მონაკვეთში.

სტატისტიკური მონაცემებით ნაკეთობის შეუფერხებელი მუშაობის საშუალო დრო ფასდება გამოსახულებით:

$$m_l = \frac{l}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (4.19)$$

სადაც t_i არის i -ური ტრანსფორმატორის შეუფერხებელი მუშაობის დრო.

(4.19) ფორმულით m_l -ს განსასაზღვრავად აუცილებელია ყველა N ტრანსფორმატორის წყობიდან გამოსვლის მომენტის ცოდნა. m_l -ს განსაზღვრა შეიძლება განტოლებით:

$$m_l \approx \sum_{i=1}^m n_i t_{l_{\text{სშ}}} \quad (4.20)$$

სადაც n_i -არის i -ურ ინტერვალში წყობიდან გამოსული ტრანსფორმატორების რაოდენობა;

$t_{l_{\text{სშ}}} = (t_{i-1} + t_i)/2$; $t_k = t_i - t_{i-1}$; t_{i-1} -ური ინტერვალის დასაწყისი; t_i -ური ინტერვალის დასასრული; t_k -დროა, რომლის განმავლობაშიც გამოვიდა წყობიდან ყველა ტრანსფორმატორი.

სტატისტიკური მონაცემებით ტრანსფორმატორის შეუფერხებელი მუშაობის დისპერსია განისაზღვრება ფორმულით:

$$D_i = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - m_i)^2. \quad (4.21)$$

რადგანაც ტრანსფორმატორი შეიძლება იყოს რეზერვში საიმედოობის მაჩვენებლად გამოიყენებენ მზადყოფნის $K_{\text{მზ}}(t)$ და გაცდენის $K_{\text{გაც}}(t)$ ფუნქციებს ან შესაბამის კოეფიციენტებს $K_{\text{მზ}}$ და $K_{\text{გაც}}$, რომლებიც განისაზღვრებიან შემდეგნაირად:

$$K_{\text{მზ}} = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{\text{მზ}}(t); K_{\text{გაც}} = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{\text{გაც}}(t);$$

$$K_{\text{მზ}} = 1 - T_{\text{აღდ}} / (T_{\text{სშ}} + T_{\text{აღდ}}); K_{\text{გაც}} = 1 - K_{\text{მზ}}; \quad (4.22)$$

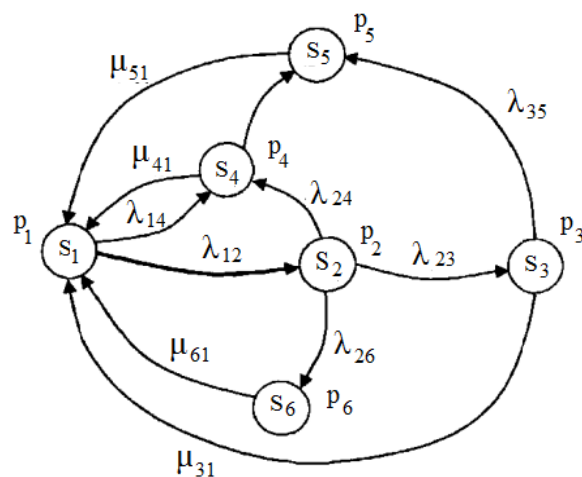
მზადყოფნის ფუნქცია $K_{\text{მზ}}(t)$ ტოლია იმ ალბათობისა, რომ t მომენტში სისტემა გამართულია, ხოლო გაცდენის ფუნქცია $K_{\text{გაც}}(t)$ -კი გაუმართავია.

საიმედოობის მაჩვენებლები, როგორც წესი, განისაზღვრებიან იმ პირობით, რომ ჩართვის მომენტში ყველა ელემენტი მზად არის მუშაობისთვის.

უფრო ხშირად აღსადგენ მოწყობილობათა საიმედოობის ანგარიშისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნეს დიფერენციალური განტოლებათა მეთოდი, რომელშიც დაშვებულია, რომ შეფერხების და აღდგენის დროებს შორის არსებობს მაჩვენებლიანი დამოკიდებულება.

დასაწყისში ჩამოითვლება სატრანსფორმატორო მოწყობილობათა შესაძლო მდგომარეობები; შედგება მისი მათემატიკური მოდელი მდგომარეობათა სქემის სახით, რომელზეც რგოლების სახით დაიტანება შესაძლო მდგომარეობები და ისრებით-ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლების შესაძლო მიმართულებები. ამ სქემის მიხედვით შედგება შესაძლებელ მდგომარეობათა დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა.

ყველა შესაძლებელ მდგომარეობებიდან გამოვყოთ მხოლოდ ნაწილი, რომელიც ნახ.4.3-ზე მოყვანილია გრაფის სახით[1]:



ნახ. 4.3. ტრანსფორმატორული მოწყობილობის მდგომარეობის გრაფა

S_1 -მუშა მდგომარეობა; S_2 -მალული დეფექტის მდგომარეობა; S_3 -შეფერხების შემდეგ აღდგენის მდგომარეობა; S_4 -გეგმიური ტექნიკური მომსახურების მდგომარეობა; S_5 -გეგმიური ავარიულ-აღსადგენი შეკეთების მდგომარეობა; S_6 -არაგეგმიური ავარიულ-აღსადგენი შეკეთების მდგომარეობა.

განსახილველი ობიექტი შეიძლება იყოს ექვსიდან ერთ-ერთ მდგომარეობაში. ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლა ხდება

ინტენსივობით, რომელიც განპირობებულია დანადგარის საიმედოობის მაჩვენებლებით. ეს ეხება როგორც λ გადასვლების, ისე μ აღდგენის ინტენსივობებს.

საწყის ინფორმაციად ავიღოთ ერთ-ერთი ტიპის ტრანსფორმატორის საიმედოობის მონაცემები. ამ ტრანსფორმატორის საიმედოობის კანონი განსაზღვრულია 20-წლიანი სტატისტიკური მონაცემების ანალიზის საფუძველზე.

მიღებულია, რომ ექსპლოატაციის პერიოდში უსაფრთხოება ხასიათდება საიმედოობის ნორმალური კანონით, რაც საშუალებას იძლევა გამოითვალოს ამ ტრანსფორმატორის შეფერხებული მუშაობის ინტენსივობა.

გადასვლების ინტენსივობები: 1-შეფერხებათა ინტენსივობა შეიძლება გამოანგარიშებულ იქნას სატრანსფორმატორო მოწყობილობის საიმედოობის ცნობილი ფუნქციით [36]. საექსპლოატაციო დოკუმენტაციიდან ამოღებული სტატისტიკური მონაცემების დამუშავებით განისაზღვრება შეფერხებათა ინტენსივობა. მიღებულია ტრანსფორმატორის საიმედოობის შემდეგი მაჩვენებლები:

$$t_{საშ} = 8760 \text{ – აღდგენად შეფერხებათა დადგომის საშუალო დრო, (სთ);}$$

$$t_{ინკ} = 300 \text{ – საინკუბაციო პერიოდის ხანგრძლივობა, (სთ);}$$

$$t_{აღდ} = 350 \text{ – შეფერხების შემდგომ აღდგენის დრო, (სთ);}$$

$$t_{გეგ.ავარ.აღდ} = 2000 \text{ – გეგმიური ავარიულ-აღდგენითი შეკეთების დრო, (სთ);}$$

$$t_{არაგეგ.ავარ.აღდ} = 1000 \text{ – არაგეგმიური ავარიულ-აღდგენითი შეკეთების დრო, (სთ);}$$

$$t_{გეგ.ტექ.მოშ} = 350 \text{ – გეგმიური ტექნიკური მომსახურების ხანგრძლივობა, (სთ).}$$

შესაბამისი გადასვლების ინტენსივობებია:

$$\lambda_{12} = 1/t_{საშ} = 1/8760 = 0,000114 ;$$

$$\lambda_{23} = 1/t_{ინკ} = 1/300 = 0,0033$$

$$\begin{aligned} \lambda_{14} &= 1/t_{\text{გეგ}} = 1/350 = 0,00286 \\ \lambda_{26} &= 1/t_{\text{არაგეგ,ავარ.დღ}} = 1/1000 = 0,001; \\ \lambda_{24} &= 1/t_{\text{ონ3}} = 1/300 = 0,0033; \\ \lambda_{45} &= 1/t_{\text{ონ3}} = 1/300 = 0,0033; \\ \lambda_{35} &= 1/t_{\text{ონ3}} = 1/(2000 - 350) = 0,0015; \\ \mu_{31} &= 1/t_{\text{აღდ}} = 1/350 = 0,00286; \\ \mu_{41} &= 1/t_{\text{გეგ,ტექ.მომ}} = 1/350 = 0,00286; \\ \mu_{51} &= 1/t_{\text{აღდ}} = 1/350 = 0,00286; \\ \mu_{61} &= 1/t_{\text{არაგეგ}} = 1/1000 = 0,001; \end{aligned}$$

ტექნიკური მომსახურების სისტემის ეფექტურობა შეფასდება J ფუნქციონალის სიდიდით, რომლითაც ხასიათდება ტრანსფორმატორის ყოფნა ტექნიკური მოსახურებისა და აღდგენის მდგომარეობებში მის შრომისუნარიან მდგომარეობაში ყოფნასთან შეფარდებით ტექნიკური მზადყოფნის მოცემულ დონეზე.

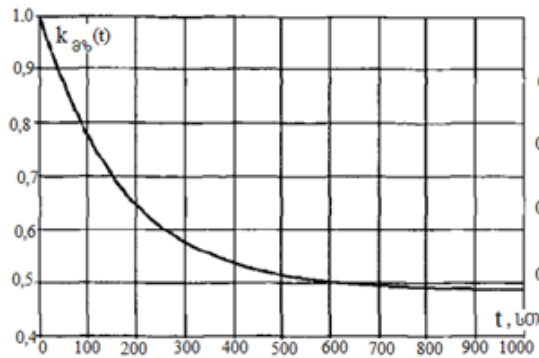
$$J = \left(\int_0^1 P_i(t) dt \right) / \left(\sum_{i=2}^n \int_0^1 P_i(t) dt \right), \quad (4.23)$$

სადაც $n=6$ – განსახილველი ტრანსფორმატორის მდგომარეობების რაოდენობაა.

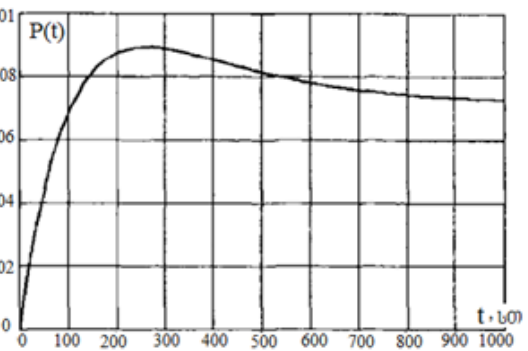
ტრანსფორმატორის სხვადასხვა მდგომარეობაში ყოფნის ინტერვალები გამოითვლება კოლმოგოროვის განტოლებათა სისტემის ამოხსნით, რომელიც შედგენილია დანადგარის ექვსი ძირითადი მდგომარეობისათვის. დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა ასეთი სახისაა:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = -p_1(\lambda_{14} + \lambda_{12}) + p_3\mu_{31} + P_4\mu_{41} + P_5\mu_{51} + P_6\mu_{61}; \\ \frac{dp_2}{dt} = -P_2(\lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{26}) + P_1\mu_{12}; \\ \frac{dp_3}{dt} = -P_3(\lambda_{35} + \mu_{31}) + P_2\lambda_{23}; \\ \frac{dp_4}{dt} = -P_4(\lambda_{45} + \mu_{41}) + P_1\lambda_{14} + P_2\lambda_{24}; \\ \frac{dp_5}{dt} = -P_5\mu_{51} + P_3\lambda_{35} + P_4\lambda_{45}; \\ \frac{dp_6}{dt} = -P_6\mu_{61} + P_2\lambda_{26}; \end{cases} \quad (4.24)$$

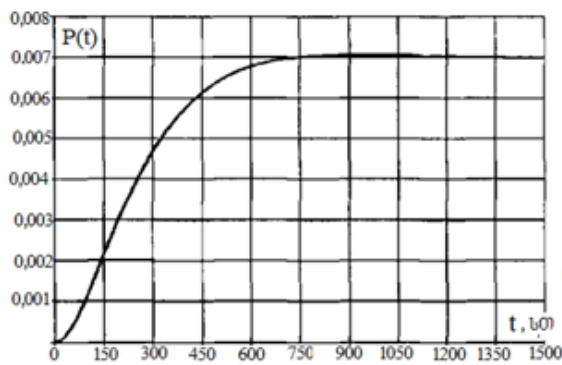
ამოცანის ამოხსნისას დაცულია მარკოვის შემთხვევითი პროცესების თეორიის ყველა დაშვება.



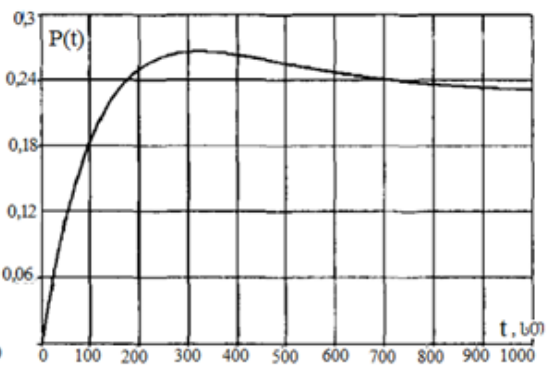
ნახ. 4.4 ტრანსფორმატორის შზადყოფნის $K_{00}(t)$ ფუნქციის მახასიათებელი დროში



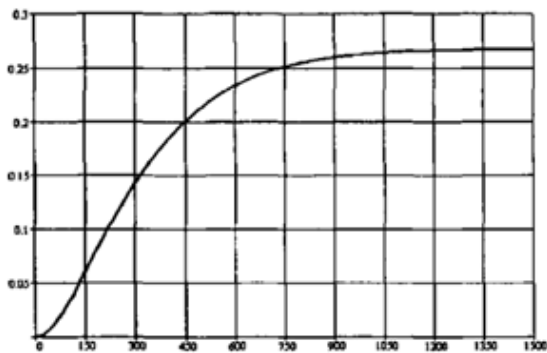
ნახ. 4.5. ტრანსფორმატორის ფარული დეფექტის მდგომარეობის ყოფნის ალბათობა (S_2)



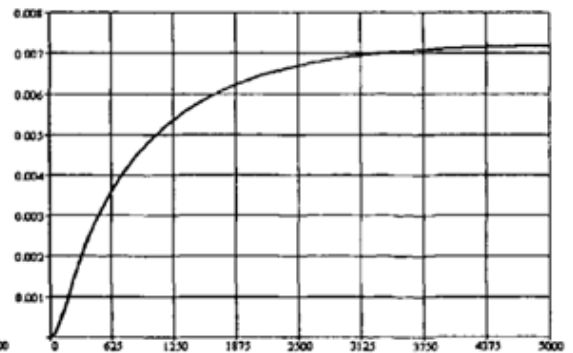
ნახ. 4.6. ტრანსფორმატორის შეფერხების შემდეგ აღდგენის მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობა (S_3)



ნახ. 4.7. ტრანსფორმატორის გეგმიურ-ტექნიკურ მომსახურების მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობა (S_4)



ნახ.4.8. ტრანსფორმატორის გეგმიურ ავარიულ-აღდგენითი შეკეთების მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობა (S_5)



ნახ.4.9. ტრანსფორმატორის არაგეგმიური ავარიულ - აღდგენითი შეკეთების მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობა (S_6)

მუშა მდგომარეობის ალბათობა $P_1(t)$ შეესაბამება ტრანსფორმატორის

მზადყოფნის $K_{\text{ფ}}$ კოეფიციენტის მნიშვნელობას (ნახ.4.4). ამ ალბათობის ინტეგრალი დროის იმ ინტერვალში, რომელიც შეესაბამება მის სტაციონარულ მნიშვნელობას, განსაზღვრავს შეუფერხებელი მუშაობის საშუალო დროს სხვა მდგომარეობებში შესაძლებელი გადასვლების გათვალისწინებით:

$$T_{\text{საშ}} = \int_0^1 P_1(t) dt \quad (4.25)$$

თუ გამოვთვლით დანარჩენი მდგომარეობების ალბათობების ანალოგურ ინტეგრალებს, მივიღებთ ტრანსფორმატორის თითოეულ მდგომარეობაში ყოფნის საშუალო დროებს, წარმოდგენილს ნახ.4.4 – ნახ.4.7-ზე. განსახილველი ნიმუშისათვის (4.15) განტოლებით გამოთვლილი ფუნქციონალური იძლევა მნიშვნელობას $J=0,499$. ტექნიკური მომსახურების გაუმჯობესებული სისტემის პირობებში ეს სიდიდე უნდა გაიზარდოს. მისი გაზრდა შეიძლება, როგორც შეუფერხებელი მუშაობის ალბათობის გაზრდით, ასევე შეკეთებისა და პროფილაქტიკის დროის შემცირებით.

ამრიგად, დამუშავებულია სხვადასხვა საექსპლუატაციო და სარემონტო მდგომარეობაში ძალური ტრანსფორმატორების მდგომარეობის ალბათობის განსაზღვრის სტატისტიკური მოდელი, რომელიც იძლევა საშუალებას თანამედროვე კომპიუტერული მოდელირების მეთოდების გამოყენებით მოვახდინოთ ძალური ტრანსფორმატორების ტექნიკური მომსახურების სისტემების პროცესების შეფასების ავტომატიზაცია.

დასკვნები

1. დადგენილია, რომ ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემისათვის დამახასიათებელ დაზიანებად გვევლინება ფოლადის ფირფიტის ფურცლებს შუა იზოლაციის დარღვევა და გრაგნილებში ხვიათა მოკლედ შერთვის წარმოქმნა. ასეთ დაზიანებას ახასიათებს დუნედ მიმდინარე განვითარება და ყოველთვის არ გამოვლინდებიან ტიპიური შემოწმების დროს, ისე, როგორც გამოჩნდებიან ნომინალური ძაბვების დროს.

2. დადგენილია რომ გრაგნილის მდგომარეობის და ავზის გაუხსნელად ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის კონტროლისათვის გამოყენებული ძირითადი მეთოდები: მოკლე შერთვის სრული წინაღობის გაზომვის, გაბნევის წინაღობისა და გრაგნილებს შუა ტევადობის გაზომვის, დაბალვოლტიანი იმპულსების და სიხშირული მახასიათებლის ანალიზის იძლევიან საშუალებას საკმაოდ კარგად გამოვლინდეს დეფორმაციები ან ტრანსფორმატორის გრაგნილის წანაცვლება, მაგრამ ისინი მგრძნობიარენი არ არიან მაგნიტური სისტემის ცვლილების მიმართ.

3. დადგენილია, რომ ტრანსფორმატორის ვიბრაციული გამოკვლევის მეთოდი საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ გრაგნილის დაწნეხვისა და მაგნიტური სისტემის მდგომარეობები, მაგრამ იგი არ გამოავლენს "პარაზიტული" კონტურების არსებობას. "პარაზიტული" კონტურების წარმოქმნას მუშა ტრანსფორმატორებში გამოავლენს თბოვიზორული გამოკვლევის მეთოდი.

4. დადგენილია, რომ უქმი სვლის დანაკარგისა და დენის გაზომვის არსებული მეთოდები მგრძნობიარენი არიან გრაგნილში არსებული დაზიანებისა და ტრანსფორმატორის მაგნიტურ სისტემაში განვითარებული დეფექტების მიმართ, მაგრამ არსებული მეთოდის ნაკლად ითვლება ტრანსფორმატორის გულარის ნარჩენი დამაგნიტების გავლენა გაზომვის შედეგებზე.

5. დადგენილია, რომ ტრანსფორმატორის უქმი სვლის ძირითად დანაკარგებს წარმოადგენს დანაკარგი ფოლადის მაგნიტურ გამტარში, რომელიც შედგება დანაკარგებისაგან ჰისტერეზისზე და გრიგალურ დენებზე. თავის მხრივ, დანაკარგის მდგენელის სიდიდე დამოკიდებულია მასალის თვისებებზე და ტრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარის გეომეტრიის საერთო მდგომარეობაზე.

6. გამოკვლეულია, რომ ელექტროტექნიკური ფოლადის ფირფიტის იზოლაციის დარღვევა იწვევს მაგნიტური გამტარის ელექტრომაგნიტური მახასიათებლების ცვლილებებს, "ელექტრომაგნიტური ლინზის" განვითარებას, ხოლო გრიგალური დენები იწვევენ "ელექტრომაგნიტური ლინზის" სივრცის გათბობას.

7. დადგენილია, რომ "ელექტრომაგნიტური ლინზის" წარმოქმნას მიყვავართ არა მხოლოდ მაგნიტური გამტარის დაზიანებამდე, არამედ იგი იწვევს დაჭუჭყიანებას და სატრანსფორმატორო ზეთის თერმულ დაშლას. "ელექტრომაგნიტური ლინზის" საწყის სტადიაზე გამოვლენის დიაგნოსტიკა ძალიან რთულია მაგნიტური გამტარის ნარჩენი მაგნეტიზმის შენიღბული მოქმედების გამო.

8. დადგენილია, რომ ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის თავისებურებად გვევლინება ნარჩენი მაგნიტური ინდუქციის არსებობა, რომელიც იწვევს ფერომაგნეტიკაში ველის მოხსნის შემდეგ, ფერომაგნეტიკის ეს თავისებურება არ იძლევა ცალსახად ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის იდენტიფიცირების საშუალებას. ნარჩენი მაგნეტიზმის გავლენის მოხსნა, დიაგნოსტიკის მეთოდის მგრძობიარობისა და არჩევითობის ამაღლება, კერძოდ, უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვის მეთოდის გაუმჯობესება შეიძლება მაგნიტოგამტარის მუდმივი დენით ხელოვნური დამაგნიტების გზით.

9. დადგენილია, რომ ტრანსფორმატორის ვოლტ-ვატური მახასიათებელი შეიძლება გადაღებული იქნას უქმი სვლის დენის დაბალი ძაბვის გაზომვის დროს. ვოლტ-ვატური მახასიათებლის გაზომვა

მაგნიტური სადენის ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში საშუალებას იძლევა გამოირიცხოს ნარჩენი მაგნეტიზმის გავლენა.

10. დადგენილია, რომ ტრანსფორმატორის გულარა უქმი სვლის რეჟიმში უქმი სვლის დენი შედგება მაღალსიხშირული ჰარმონიკებისაგან. ტრანსფორმატორის გრაგნილისა და მაგნიტოგამტარის ტექნიკურ მდგომარეობაზე დამოკიდებულებით იცვლება უქმი სვლის დენის ჰარმონიული მდგენელი. ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენის ჰარმონიული მდგენელის ცვლილების შედარება შეიძლება ჩატარდეს ფურის დისკრეტული გარდაქმნის მეშვეობით.

11. დადგენილია, რომ ტრანსფორმატორის გულარის ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში ჩატარებული გაზომვები საშუალებას იძლევა გამოვლინდეს დეფექტები, რომლებიც თავს იჩენენ მხოლოდ სამუშაო რეჟიმში ნომინალური ძაბვების დროს.

12. დადგენილია, რომ უქმი სვლის დანაკარგის გაზომვის მეთოდის დიაგნოსტიკური შესაძლებლობები, რომელიც დაბალი ძაბვების დროს შეიძლება გაფართოებული იქნეს გრიგალურ დენებზე A_2 და ჰისტერეზისზე A_1 დანაკარგების მდგენელების პოვნის გზით ვოლტ-ვატური მახასიათებლის გაზომვების შედეგების მიხედვით.

13. დადგენილია, რომ ფოლადის გულარის არაწრფივი თვისებები ყველაზე ძლიერად ვლინდება დამაგნიტების მრუდის მეორე მოღუნვის მიდამოში. დამაგნიტებული კონტურის რეზონანსული მახასიათებლის ცვლილება რომელიც გამოწვეულია დეფექტების არსებობით, იწვევენ არა მხოლოდ სიმძლავრის ჰარმონიკის ცვლილებას, არამედ პირობითი მაქსიმუმის გადაწევასაც.

14. დამტკიცებულია თანამედროვე პირობებში ენერგოეფექტური ღონისძიებების გატარებისათვის სამფაზა ტრანსფორმატორის მათემატიკური მოდელის საჭიროება.

15. ძალური ტრანსფორმატორებში განვითარებადი დეფექტების დადგენის მიზნით შემუშავებული იქნა სპეციალური ალგორთმი, რომელიც

საშუალებას იძლევა საკმაო სიზუსტით განვსაზღვროთ განვითარებადი დეფექტის სახე, მისი გამომწვევი მიზეზი და მოსალოდნელი შედეგი.

ლიტერატურა

1. Михеев Г.М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования. – М.: 2008. 304 с.
2. Belanger M. Transformerdiagnosis: Part 1. A statistical justificationfor preventative maintenance /M.Belanger.Electricity today. 1999, #6, P.15-17.
3. მუსელიანი თ., ბოდოკია თ., გურგენიძე ზ. ელექტრომონოწილობათა ტექნიკური დიაგნოსტიკა. ნაწილი II. მაღალი ძაბვის მონოწილობები და მათი დიაგნოსტიკა. თბილისი: საგამომცემლო სახლი "ტექნიკური უნივერსიტეტი", 2012, 325 გვ.
4. Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Дементьев Ю.А. и др. О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей. Электрические станции. 2005, № И, с.69 - 75.
5. Хренников А.Ю., Рубцов А.В., Предельский В.А. и др. О повреждении обмоток силовых трансформаторов и диагностике их геометрии методом низковольтных импульсов. Электро. 2004, № 5, С.13-18.
6. Хренников А.Ю., Киков О.М., Передельский В.А. и др. Применение метода низковольтных импульсов для диагностики состояния силовых трансформаторов. Энергетик. 2005, № 9, с. 11 - 14.
7. Хренников А.Ю. Опыт обнаружения остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов. Энергетик. 2003, № 7.
8. Дробышевский А.А., Левицкая Е.И, Андреев Д.В. и др. Диагностика деформаций обмоток силовых трансформаторов и реакторов методом низковольтных импульсов. Электрические станции. 1997, № 3, С.71 - 74.
9. Wang M., Vandermaar A.J., Srivastava K.D. Transformer Winding Movement Monitoring in Service - Key Factors Affecting FRA Measurements. IEEE El. Ins. Mag.2004, V. 20 # 5, p. 5 - 12.
10. Christian J., Feser K., T. Leibfried, F. Jaeggi. Переходная функция - метод определения эффективности испытаний током короткого замыкания и диагностики изоляции на месте установки трансформатора. Elektrizitaetswirtschaft. 1999, № 7, p.40 - 44.

11. Худяков З.И. Ремонт трансформаторов. Учеб.б-е изд., перераб. И доп. -М.: Высш. шк., 1986, с. 232.
12. Алексеев Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. М.: НЦ ЭНАС, 2002, с. 97 - 98.
13. Lachman M.F. Диагностика трансформатора посредством анализа тока намагничивания. IEEE Trans, on Power Deliv. 1994, V.9. № 3, p. 1466 - 1475.
14. Фиорилло Ф., Новиков А. А. Цифровой осциллографический метод измерения потерь в магнитных материалах.Электричество. 1991, № 8, с. 34
15. Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филлипов Б.Н. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Наука, 1992, с. 272.
16. მეგრელიძე ი. ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენის ჰარმონიული მდგენელი. საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი ინტელექტუალი. 2013, # 23.
17. მეგრელიძე ი. ტრანსფორმატორის გულარის ხელოვნური დამაგნიტების რეჟიმში დიაგნოსტიკური პარამეტრების გაზომვა. სტუდენტთა მე-80 ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის თეზისების კრებული. "ტექნიკური უნივერსიტეტი". 2012, გვ. 52.
18. Козлов В.К., Муратаев И.А., Муратаева Г.А. Моделирование трансформатора с учетом нелинейности магнитной системы // Доклады всероссийской науч. - техн. конф. «Информационные системы и модели в научных исследованиях, промышленности и экологии». Тула, 2007, с. 42 -43.
19. Yanase S., Okazaki Y, Asano T. AC magnetic properties of electrical steel core under DC - biased magnetization . P. 156 - 158.
20. Козлов В.К., Муратаев И.А., Муратаева Г.А. Диагностические параметры трансформатора в режиме намагничивания. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: пятнадцатая международная науч. - техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3 - х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2009, Т.3. С. 397 -398.

21. Козлов В.К., Муратаев И.А., Муратаева Г.А. Определение диагностических параметров трансформатора в режиме искусственного намагничивания. Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. 2008, № 9, 10, с. 52 -58.
22. Вержбицкий В.М. Численные методы. Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения: Учеб. пособие для ВУЗов. М.: Высш. шк, 2001, с. 382.
23. Дегтярева А., Вежневек В. Line fitting, или методы аппроксимации набора точек прямой. URL: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/41>. უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული -27.03.13
24. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов, 2-е издание.: Пер. с англ. -М.: ООО "Бином - Пресс", 2007. - 656 с : ил.
25. Арбузов С., Соловьева. Е.Б., Солонина А.И., Улахович Д.А. Курс лекций Основы цифровой обработки сигналов:, Изд.2-е испр. и перераб. СПб.: БХВ Петербург, 2005, с.768.
26. Муратаев И.А., Муратаева Г.А. Пат. 2354982 Российская Федерация. Способ диагностики магнитной системы трансформатора. заявл. 23.07.2007; опубл. 10.05.2009, Бюл. №13.
27. Feller U., Boesch H.R. Magnetic losses of electrical steel with a large biasing DC flux density , J.Mag.Mater. 1981, V.26, P. 65 - 68.
28. Козлов В.К., Муратаев И.А., Муратаева Г.А. Искусственное намагничивание трансформатора для определения диагностических параметров. Материалы докл. Международной научно - технической конференции «Энергетика 2008: инновации, решения, перспективы». В 5т. Т.2 - Казань, Казанский Государственный Энергетический Университет, 2008, с. 17-21.
29. Козлов В.К., Муратаев И.А., Муратаева Г.А. Определение диагностических параметров трансформатора в режиме искусственного намагничивания. Материалы докл. III - и молодежной Международной науч. конф. «Тинчуринские чтения». В 4т. Т. 1 - Казань, Казанский Государственный Энергетический Университет. 2008, с. 33 - 34.

30. მუსელიანი თ., ჭყონია გ., მეგრელიძე ი. დატვირთული სამფაზა ტრანსფორმატორის მათემატიკური მოდელი. GEORGIAN ENGINEERING NEWS. 2011, # 4, გვ. 58-62.
- 31 აბურჯანია ა., ნაჭყებია შ., მუსელიანი თ., აბურჯანია ლ. ინდუქციურად დაკავშირებული წრედები. თბილისი. 2007, 250გვ.
32. Муселиани Т.Г. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек. Georgian Engineering news. #1, 2004, с.126-130.
33. Муселиани Т.Г. О взаимноиндуктивно связанных электрических цепях. Georgian Engineering news. # 4, 2002, с.138-143
34. მუსელიანი თ., ჭყონია გ., მეგრელიძე ი. ძალურ ტრანსფორმატორში განვითარებადი დეფექტების განსაზღვრის ალგორითმი. ყოველკვარტალური სამეცნიერო ჟურნალი „ბიზნეს-ინჟინერინგი“. 2012. # 2(3), გვ.93-98.
35. მეგრელიძე ი. ძალური ტრანსფორმატორების საიმედოობის მაჩვენებლების ანგარიში. საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი „ინტელექტუალი“. 2013, # 22, გვ.194-200.
36. Барзилович Е.Ю., Беляев Ю.К.Б Каштанов В.А. и др. Вопросы математической теории надежности. М.:Радио и связь, с.1983.-184.