

ქეთევან ჩიხლაძე

ზეთის დაძველების პროდუქტების გავლენა
ტრანსფორმატორის ახალი ზეთის თვისებებზე

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
2014 წელი

საავტორო უფლება ©2014 წელი, ჩიხლაძე ქეთევანი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავაცანით ჩიხლაძე ქეთევანის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ზეთის დამკვლავების პროდუქტების გავლენა ტრანსფორმატორის ახალი ზეთის თვისებებზე“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

2014

ხელმძღვანელი: შალვა ნაჭყებია

რეცენზენტი: თენგიზ მუსელიანი

რეცენზენტი: ვახტანგ გიორგობიანი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2014 წელი

ავტორი: ჩიხლაძე ქეთევანი

დასახელება: „ზეთის დამკვლევების პროდუქტების გავლენა

ტრანსფორმატორის ახალი ზეთის თვისებებზე”

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: 2014

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი 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

ქეთევან ჩიხლაძის დისერტაცია „ზეთის დამველების პროდუქტების გავლენა ტრანსფორმატორის ახალი ზეთის თვისებებზე“ ეხება ენერგეტიკის აქტუალურ პრობლემას, რემონტის შემდეგ ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ზედაპირზე და მყარი იზოლაციის მოცულობაში დარჩენილი ზეთის დამველების პროდუქტებით ახალი ზეთის თვისებების ცვლილებას. ნაშრომი შედგება 114 გვერდისაგან და დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი დისერტაციის გაფორმების ინსტრუქციის მიხედვით მოიცავს: ტიტულის გვერდს, ხელმოწერების გვერდს, საავტორო უფლებების გვერდს, რეზიუმეს ორ ენაზე (ქართულ–ინგლისური), შინაარსს (სარჩევს), ცხრილების და ნახაზების ნუსხას. ძირითადი ტექსტი შედგება ლიტერატურის მიმოხილვის, ოთხი თავის, დასკვნის და გამოყენებული ლიტერატურის სიისაგან.

პირველ თავში განხილულია ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის შესაქმნელად გამოყენებული ელექტროტექნიკური ქაღალდის და ტრანსფორმატორის ზეთის მიღების ტექნოლოგია და მარკები. აღწერილია ამ მასალების დამველების პროცესი ექსპლუატაციაში ელექტეული ველის, ტემპერატურის, ტენშემცველობის და სხვა ფაქტორების ერთობლივი მოქმედებისას. აღნიშნულია მეტალის კატალიზატორული როლი ზეთის დამველების პროცესის მიმდინარეობაზე და მეტალორგანული შენაერთების წარმოქმნის პროცესზე.

განხილულია დამველების პროდუქტებით ტრანსფორმატორის ზეთის ფიზიკური და ელექტრული პარამეტრების ცვლილება.

აქვე აღწერილია ზეთის დამველების პროდუქტების ტრანსფორმატორის აქტიურ ნაწილზე და მყარი იზოლაციის ზედაპირზე დალექვა ანუ დამველების პროდუქტების ნალექის – შლამის წარმოქმნა.

განხილულია დამველების პროდუქტების შეღწევის მექანიზმი მყარი იზოლაციის მოცულობაში, ხოლო ელექტრომოწილობაში ახალი ზეთის გამოყენების შემდეგ მათი მყარი იზოლაციიდან ახალ ზეთში გახსნა.

მეორე თავში აღწერილია ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლების განსაზღვრის ევროპული და ჩვენთან სტანდარტით გამოყენებული მეთოდები. მნიშვნელოვანი ყურადღება აქვს დათმობილი ტრანსფორმატორის ახალი და საექსპლუატაციო ზეთის მახასიათებლების ნორმებს და ზეთის მდგომარეობის ამ ნორმების მიხედვით შეფასებას. გაანალიზებულია ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლების საექსპლუატაციო ზღვრული დასაშვები მნიშვნელობები.

აღწერილია ტრანსფორმატორის ზეთში მყარი (მექანიკური) მინარევების რაოდენობის და ზომების განსაზღვრის მეთოდები და მინარევების რაოდენობის და ზომების მიხედვით ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავის კლასის დადგენის ევროპული და ჩვენთან მიღებული მეთოდები.

მესამე თავში განხილულია ცდისთვის ახალი *Nytril 1GS* და *T-1500* და რეგენირებული *T-1500* ზეთების მომზადების მეთოდები, კერძოდ მათი ფილტრაციის, დეგაზაციის და ტენშემცველობის შემცირების და საექსპლუატაციო ახალი ზეთის ნორმის შესაბამისად მომზადების წესები.

აღწერილია ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტების და მყარი მინარევების ცდისთვის მომზადების მეთოდიკა, მისი ტენშემცველობის მინიმუმამდე შემცირების საშუალებები.

აგრეთვე მესამე თავში აღწერილია გრაფიტის (ნახშირის) მინარევების მომზადების და ფრაქციული დაყოფის მეთოდი. ამავე თავში განხილულია საცდელ ზეთებში მინარევების გახსნის საშუალებები და სინჯების ცდისთვის მომზადება.

მეოთხე თავში მოყვანილია ცდით მიღებული შედეგები, კერძოდ ყველა სახის მინარევების რაოდენობის გაზრდით ტრანსფორმატორის ახალი ზეთის გამრღვევი ძაბვის, კუთრი წინაღობის და ზედაპირული დაჭიმულობის შემცირება და დიელექტრიკული დანაკარგების და რეფრაქციის კოეფიციენტის ზრდა, როდესაც ტრანსფორმატორის ზეთის ტენშემცველობა არ იცვლებოდა.

ამავე თავში აღწერილია და გაანალიზებულია ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების კავშირი ზეთის ზედაპირულ დაჭიმულობასთან, ზეთის მინიმალური ტენშემცველობისას.

მიღებული შედეგების ანალიზმა დაამტკიცა, რომ ზეთის დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდა საექსპლუატაციოდ მომზადებული ახალი და რეგენირებული ზეთების ყველა მახასიათებლების გაუარესებას იწვევს და უმეტეს შემთხვევაში ზეთის მახასიათებლების სიდიდე საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნას არ აკმაყოფილებს.

მიღებული შედეგების ანალიზით გამოტანილია მეცნიერული ღირებულების დასკვნები და პრაქტიკული მნიშვნელობის რეკომენდაციები.

Abstract

The current dissertation “Impact of aging oil products on transformer oil properties” by Ketevan Chikhladze refers to the latest energy problem, changes of the new oil properties after repair of transformer on the surface of active part of it and in the volume of fixed insulation by the remaining old oil. The work consists of 114 pages and contains: title page, signature page, copyright page, a summary in two languages (georgian-english), content (index), list of tables and drawings in accordance with the instruction for the submission of dissertation for the doctoral degree. The main text consists of a literature review, four chapters, conclusions and a list of references.

The first chapter deals with the technology and stamps of the electrical transformer oil and paper transformer used for making the insulation system. There is described their aging process while simultaneous implementation of electric field, temperature, humidity and other factors. There is mentioned also the catalyst role of the metal in the aging process and in the generating process metalorganic compounds. There are reviewed the changing of the physical and electrical parameters of the transformer oil by aging products.

The paper describes also precipitation of aging oil products in the active part of the transformer and on the surface and the sludge formation.

The paper discusses the mechanism of penetrating aging products into the volume of fixed insulation, and their dissolving in new oil from fixed insulation after using of new oil in electric appliances.

The second chapter describes the european and standard methods of defining characteristics of transformer oil. Considerable attention has been attached to the transformer oil characteristics and operational limits, conditions in the oil, assessment according to the norms. It has been analyzed the maximum permissible values of the transformer oil performance characteristics.

The paper describes quality and measurement methods of fixed (mechanical) mixtures and determining of transformer oil cleanliness class according to the number and size of mixtures with the European and our methods.

The third chapter deals with new *Nytr011GS* and *T – 1500* and regenerated *T – 1500* preparation methods, in particular their filtering, reducing the exploitation of new oil humidity and provision of training rules.

There have been discussed transformer oil aging products and methods of preparation of fixed mixtures, minimizing its humidity facilities.

The third chapter also describes the mixture preparing and fractional partitioning method of graphite (carbon). The chapter discusses the experimental techniques and sample tests to prepare for the dissolving of the oil mixtures.

The fourth chapter provides the obtained test results, in particular by increasing the number of all kinds of impurities of transformer oil broaching voltage, specific resistivity and dielectric losses and refractive coefficient of surface tension reduction and an increase in the transformer oil humidity was not changed.

In the same chapter are described and analyzed the top dielectric losses of the transformer oil in connection with the surface tension of the oil , the oil minimum humidity.

Analysis of the results demonstrated that increasing the number of products in the exploitation of new oil aging and deterioration of the characteristics regenerated

all oils and in most cases do not meet the strict requirements of operational performance characteristics of the oil.

According to the obtained results from the analysis of the findings there have been determined the scientific value and recommendations of practical significance.

შინაარსი

| | |
|--|----|
| სატიტულო გვერდი | 1 |
| ხელმოწერების გვერდი | 2 |
| საავტორო უფლების გვერდი | 3 |
| რეზიუმე (ორ ენაზე) | 4 |
| შინაარსი | 8 |
| ცხრილების ნუსხა | 10 |
| ნახაზების ნუსხა | 11 |
| შესავალი | 13 |
| ლიტერატურის მიმოხილვა | 17 |
| შედეგები და მათი განსჯა | 20 |
| ექსპერიმენტალური ნაწილი | 22 |
| თავი 1. ამოცანის დასმა | 24 |
| 1.1. ტრანსფორმატორის ზეთის მიღება და დანიშნულება | 24 |
| 1.2. ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლები | 28 |
| 1.3. მინარევები ტრანსფორმატორის ზეთში | 33 |
| 1.4. ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველებით წარმოქმნილი მინარევები | 39 |
| 1.5. ელექტროტექნიკური ქაღალდის დაძველებით წარმოქმნილი მინარევები | 44 |
| დასკვნა 1 თავის მიმართ | 50 |
| თავი 2. ტრანსფორმატორის ზეთის პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდები | 53 |
| 2.1 ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის განსაზღვრა | 53 |
| 2.2 ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის განსაზღვრა | 57 |
| 2.3 ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების განსაზღვრა | 60 |
| 2.4 ტრანსფორმატორის ზეთის ფარდობითი დიელექტრიკული შელწევადობის განსაზღვრა | 64 |
| 2.5 ტრანსფორმატორის ზეთში მექანიკური მინარევების განსაზღვრა | 66 |

| | |
|--|-----|
| 2.6 ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობის განსაზღვრა | 71 |
| 2.7 ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხვის მაჩვენებლის განსაზღვრა | 76 |
| დასკვნა 2 თავის მიმართ | 78 |
| თავი 3. ზეთების და დამკვლავების პროდუქტების მომზადება | 80 |
| 3.1 ტრანსფორმატორის ზეთები და მათი საწყისი მახასიათებლები | 80 |
| 3.2 ტრანსფორმატორის ზეთის დამკვლავების პროდუქტების მომზადება | 85 |
| 3.3 გრაფიტის ნაწილაკების მომზადება | 87 |
| დასკვნა 3 თავის მიმართ | 88 |
| თავი 4. მინარევების გავლენა ახალი და რეგენირებული ზეთის თვისებებზე | 89 |
| 4.1 ტრანსფორმატორის ზეთების საწყისი მახასიათებლები | 89 |
| 4.2 ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთების გამრღვევი ძაბვის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე | 92 |
| 4.3 ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთების დიელექტრიკული დანაკარგების დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე | 97 |
| 4.4 ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთების კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე | 101 |
| 4.5 ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთების ზედაპირული დაჭიმულობის და რეფრაქციის კოეფიციენტის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე | 106 |
| დასკვნა 4 თავის მიმართ | 109 |
| დასკვნა | 111 |
| გამოყენებული ლიტერატურა | 113 |

ცხრილების ნუსხა

| | |
|---|-----|
| ცხრილი 1.1 ნახშირწყალბადები ტრანსფორმატორის ზეთში | 25 |
| ცხრილი 1.2 ქაღალდის ელექტრული მახასიათებლები | 47 |
| ცხრილი 2.1 ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის განსასაზღვრავი უჯრედის მახასიათებლები | 54 |
| ცხრილი 2.2 ტრანსფორმატორის ზეთში მექანიკური მინარევების ზომების მიხედვით დაყოფა | 69 |
| ცხრილი 2.3 ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავის კლასის დადგენის ნორმები | 70 |
| ცხრილი 2.4 გამოხდილი წყლის სიმკვრივე და ზედაპირული დაჭიმულობა სხვადასხვა ტემპერატურაზე | 74 |
| ცხრილი 3.1 საექსპლუატაციოდ მომზადებული ტრანსფორმატორის $T - 1500$ მარკის ახალი ზეთის მახასიათებლები | 84 |
| ცხრილი 3.2 ტრანსფორმატორის $T - 1500$ მარკის რეგენირებული ზეთის მახასიათებლები | 85 |
| ცხრილი 3.3 ტრანსფორმატორის ზეთის დამკვლავების პროდუქტების მახასიათებლები | 86 |
| ცხრილი 4.1 ცდებში გამოყენებული ზეთების საწყისი მახასიათებლები | 89 |
| ცხრილი 4.2 ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის ცვლილება მინარევების რაოდენობის მიხედვით | 93 |
| ცხრილი 4.3 გრაფიტის მინარევების გავლენა ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრულ მახასიათებლებზე | 96 |
| ცხრილი 4.4 ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების ($tg\delta$, %) ცვლილება სხვადასხვა ტემპერატურაზე მინარევების რაოდენობის მიხედვით | 98 |
| ცხრილი 4.5 ტრანსფორმატორის ზეთისკუთრი წინაღობის (ρ , 10^{10} ომი.მ) დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე..... | 102 |
| ცხრილი 4.6 ტრანსფორმატორის ზეთის რეფრაქციის კოეფიციენტის და ზედაპირული დაჭიმულობის (σ) ცვლილება მინარევების რაოდენობის მიხედვით | 107 |

ნახაზების ნუსხა

| | |
|--|----|
| ნახ. 1.1 წყლის მდგომარეობის ცვლილება ტრანსფორმატორის ზეთში | 36 |
| ნახ. 1.2 მყარი მინარევები ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ზედაპირზე | 38 |
| ნახ. 1.3 მყარი იზოლაციის მოცულობაში შეღწეული ზეთის დაძველების პროდუქტები | 38 |
| ნახ. 1.4 დაძველების შედეგად ზეთის ფერის ცვლილება | 38 |
| ნახ. 1.5 ტრანსფორმატორის ახალ ზეთში მყარი იზოლაციიდან მინარევების გახსნა | 43 |
| ნახ. 1.6 ცელულოზის მოლეკულის სტრუქტურული ფორმულა | 44 |
| ნახ. 1.7 ტრანსფორმატორის ზეთში მყოფი KMTY-080 მარკის საკაბელო ქაღალდის პოლიმერიზაციის ხარისხის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე და დაძველების ხანგრძლივობაზე | 49 |
| ნახ. 1.8 ტრანსფორმატორის ზეთით გაჟღენთილი KMTY-080 მარკის პოლიმერიზაციის ხარისხის დამოკიდებულება დროზე და ჟამგზადის შემცველობაზე | 50 |
| ნახ. 2.1 ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრული სიმტკიცის განსასაზღვრავი უჯრედის ელექტროდების ფორმები | 54 |
| ნახ. 2.2 ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის განსასაზღვრავი უჯრედი | 55 |
| ნახ. 2.3 АИМ-90 ტიპის დანადგარის გამარტივებული ელექტრული სქემა | 57 |
| ნახ. 2.4 თხევადი დიელექტრიკების ρ , $tg\delta$ და ϵ განსასაზღვრავი უჯრედის სქემა | 58 |
| ნახ. 2.5 ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების და შეღწევადობის შერინგის ბოგირით გაზომვის გამარტივებული სქემა | 62 |
| ნახ. 2.6 ტრანსფორმატორის ზეთში მექანიკური მინარევების რაოდენობის დასადგენი ფოტომეტრული ანალიზატორი АОЗ-101 | 67 |
| ნახ. 2.7 სითხის ზედაპირული დაჭირმულობის გაზომვის სქემა | 72 |
| ნახ. 2.8 ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭირმულობის გასაზომი ხელსაწყო | 73 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| ნახ. 3.1 | <i>Nytro 11GX</i> მარკის ზეთის სერთიფიკატი | 81 |
| ნახ. 3.2 | <i>T – 1500</i> მარკის ზეთის სერთიფიკატი | 82 |
| ნახ. 4.1 | დაძველების პროდუქტებით ტრანსფორმატორის ზეთის ფერის ცვლილება | 91 |
| ნახ. 4.2 | გრაფიტის ნაწილაკებით ტრანსფორმატორის ზეთის ფერის ცვლილება | 91 |
| ნახ. 4.3 | ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის დამოკიდებულება დაძველების პროდუქტების მყარი ნაწილაკების რაოდენობაზე | 95 |
| ნახ. 4.4 | ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის დამოკიდებულება გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე | 95 |
| ნახ. 4.5 | 90° C ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების დამოკიდებულება ზეთის დაძველების პროდუქტების მყარი ნაწილაკების რაოდენობაზე | 100 |
| ნახ. 4.6 | 90° C ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების დამოკიდებულება გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე | 100 |
| ნახ. 4.7 | ტრანსფორმატორის ზეთების კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე მინარევების გახსნამდე .. | 103 |
| ნახ. 4.8 | ტრანსფორმატორის ზეთების კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე მინარევების მაქსიმალური გახსნის შემდეგ | 103 |
| ნახ. 4.9 | 90° C ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ზეთის დაძველების პროდუქტების მყარი ნაწილაკების რაოდენობა | 104 |
| ნახ. 4.10 | 90° C ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე | 104 |
| ნახ. 4.11 | ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე | 108 |
| ნახ. 4.12 | ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების $\epsilon_{\delta 90}$ დამოკიდებულება ზედაპირულ დაჭიმულობაზე | 108 |

შესავალი

მეცნიერული სიახლე. ექსპლუატაციის განმავლობაში ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლები უარესდება. ზეთი განიცდის დაძველებას, რის შედეგად ზეთში დაძველების პროდუქტები წარმოიქმნება, რომლებიც ტრანსფორმატორის ზეთში იხსნებიან ან ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის და მყარი იზოლაციის ზედაპირზე გამოიყოფიან. ზედაპირთან სუსტ კოვალენტურ კავშირს ამყარებენ და მჭიდროდ ეკვრიან ზედაპირს.

ტრანსფორმატორის მყარი იზოლაცია ძირითადად ელექტროტექნიკური ქაღალდს და მუყაოს წარმოადგენს, რომელიც ფორებს შეიცავენ და ცელულოზა დიპოლური მოლეკულებისგან შედგებიან. ასეთ მოლეკულებთან დაძველების პროდუქტების დიპოლური ნაწილაკები კოვალენტურ კავშირს ამყარებენ და ელექტრული ველის ტემპერატურის გავლენით თანდათანობით მოცულობაშიც აღწევენ.

დაძველების პროდუქტების ნაწილი ტრანსფორმატორის ზეთში იხსნება, ხოლო მცირე ზომის მყარი ნაწილაკები კი ზეთში შეტივტივებული არიან.

დაძველების პროდუქტები ზეთის ყველა მახასიათებლების გაუარესებას იწვევენ და როდესაც მახასიათებლის მნიშვნელობები ზეთის საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნებს არ აკმაყოფილებს ზეთს აღდგენას – რეგენერაციას უტარებენ, ხოლო ძლიერ დაძველებულ ზეთს, რომლის რეგენერაცია შეუძლებელია ახალი ზეთით ცვლიან.

ახალი ან რეგენირებული ზეთის გამოყენებამდე ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის და მყარი იზოლაციის ზედაპირს დაძველების პროდუქტებიდან ასუფთავებენ და ტექნოლოგიური ზეთით რეცხავენ, მაგრამ აქტიური ნაწილის ზოგიერთ უბნებში დაძველების პროდუქტების ნაწილი რჩება, ხოლო მყარი იზოლაციის მოცულობაში შეღწეული დაძველების პროდუქტების მთლიანად მოცილება შეუძლებელია.

ამგვარად გარემონტებული ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ზედაპირზე და მყარი იზოლაციის მოცულობაში ყოველთვის რჩება ზეთის დაძველების პროდუქტები, რომლებიც საექსპლუატაციოდ მომზადებულ ახალ ზეთში გახსნის შემთხვევაში მინარევებს წარმოადგენენ და ზეთის თვისებების გაუარესებას იწვევენ.

საექსპლუატაციო გამოცდილებამ აჩვენა, რომ გარემონტებულ ტრანსფორმატორში ახალი ზეთის თვისებები უფრო ადრე განიცდის ცვლილებას, ვიდრე ახალ ტრანსფორმატორში, რაც უდავოა ზეთის დაძველების პროდუქტების ნარჩენებით არის გამოწვეული.

ახალ ზეთში, ზეთის დაძველების პროდუქტების გახსნა ხანგრძლივი დროის განმავლობაში მიმდინარეობს, მაგრამ ზეთის ტემპერატურის გაზრდით ეს პროცესი ჩქარდება.

ტრანსფორმატორში რემონტის შემდეგ დარჩენილი ზეთის დაძველების პროდუქტების გავლენა ახალი ან რეგენირებული ზეთის თვისებებზე პრაქტიკულად შესწავლილი არ არის და მისი შესწავლა, როგორც მეცნიერული, ასევე პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით სიახლეს წარმოადგენს.

კვლევის აქტუალობა. ზეთით შევსებული ელექტროტექნიკური მოწყობილობების მუშაობის საიმედოობას მისი საიზოლაციო სისტემის მდგომარეობა განაპირობებს, რომლის ერთ-ერთ კომპონენტს ტრანსფორმატორის ზეთი წარმოადგენს. ზეთის მახასიათებლები ექსპლუატაციის განმავლობაში იცვლება. თუ რომელიმე მახასიათებელი ნორმის მოთხოვნას არ აკმაყოფილებს ზეთს აღდგენას უტარებენ ან ახლით ცვლიან, მაგრამ ზეთის დაძველების პროდუქტების ნაწილი მაინც რჩება ელექტრომოწყობილობაში.

საექსპლუატაციოდ მომზადებული ახალი ან რეგენირებული ზეთის მახასიათებლების ნორმა უფრო მაღალია, ვიდრე საექსპლუატაციოსი და ელექტრომოწყობილობაში ახალი ზეთის რამოდენიმე ხნით მუშაობის შემდეგ ზეთის მახასიათებლები უკვე საექსპლუატაციო ნორმის მიხედვით

ფასდება. ამდგვარად ექსპლუატაციაში ახალი ზეთის მახასიათებლის სწრაფი გაუარესება საექსპლუატაციო ნორმით არის დაფარული, რეალურად კი ზეთის დამველების პროდუქტებით არის გამოწვეული.

კვლევის აქტუალობა მდგომარეობს იმაში, რომ დღემდე ლიტერატურაში არ მოიპოვება ინფორმაცია, რა გავლენას ახდენს ახალი ან რეგენირებული ზეთის თვისებებზე ზეთის დამველების პროდუქტები, რომლებიც რემონტის შემდეგ დარჩა აქტიური ნაწილის ზედაპირზე ან მყარი იზოლაციის მოცულობაში.

ამ საკითხის გადაწყვეტა, როგორც მეცნიერული ისე პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით აქტუალურია. მიღებული შედეგები საშუალებას მოგვცემს შევაფასოთ გარემონტებულ ელექტრომოწყობილობაში ახალი, ძვირადღირებული ზეთი გამოვიყენოთ თუ რეგენირებული.

შედეგები. პირველად მოხდა ახალი ან რეგენირებული ზეთის თვისებებზე ზეთის დამველების პროდუქტების გავლენის შესწავლა, კერძოდ გამოვლინდა დამველების პროდუქტების მყარი ნაწილაკების რაოდენობის გაზრდით მნიშვნელოვანი გაუარესება ახალი ზეთის მახასიათებლების. უმეტეს შემთხვევაში მახასიათებლების სიდიდე საექსპლუატაციო ნორმის ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობას აღემატებოდა.

აღსანიშნავია, რომ დამველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდით ახალი ან რეგენირებული ზეთის ყველა მახასიათებლის გაუარესება ერთდროულად ხდებოდა, ე.ი. ზეთის დამველების პროდუქტები ახალი ან რეგენირებული ზეთის მახასიათებლებს კომპლექსურად ცვლის.

ნაშრომის აპრობაცია. ნაშრომის შედეგები წარდგენილი იყო საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის №17 მიმართულების თემატურ სემინარზე, მე-3 კოლოკვიუმზე და დადებითად იქნა შეფასებული.

2013 წლის 25–26 მაისს ქუთაისში მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე „ენერგეტიკა, რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივა“.

სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს 114 გვერდს და შედგება შესავლის, ოთხი თავის, დასკვნის და გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალისგან.

1. ლიტერატურის მიმოხილვა

1. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов: М. „Издательство НЦЭНАС”, 2002, გვ. 211

განხილულია მაღალი ძაბვის 120–მდე ტრანსფორმატორის ავარიის მიზეზები, რომელთაგან 15%–ზე მეტი გამოწვეული იყო საექსპლუატაციო ზეთი მახასიათებლების გაუარესებით, ხოლო 5% კი ზეთის უმაულო დაძველებით, 2%–ზე მეტი კი სხვადასხვა სახის მინარევებით ზეთის დაბინძურებით.

მოყვანილია ფაქტი, როდესაც გარემონტებულ ტრანსფორმატორში ახალი ან რეგენირებული ზეთი ჩაისხა, მაგრამ ზეთის მახასიათებლები ექსპლუატაციის ერთი წლის განმავლობაში მნიშვნელოვნად გაუარესდა, კერძოდ გაიზარდა მყარი მინარევების რაოდენობა, დიელექტრიკული დანაკარგები, შემცირდა გამრღვევი ძაბვა და სხვა.

2. Шуварин Д.В. Актуальные вопросы применения трансформаторных масел. www.oil@orgres-f.ru გვ. 8.

განხილულია ექსპლუატაციის პირობების გავლენა ტრანსფორმატორის სხვადასხვა სახის ზეთების საექსპლუატაციო თვისებებზე. მნიშვნელოვანი ყურადღება დათმობილი აქვს ტრანსფორმატორის ავზის და აქტიური ნაწილის ტექნიკურ სისუფთავეს, კერძოდ მეტალის და მყარი იზოლაციის დამუშავების ნარჩენებისგან ავზის გაწმენდას. ცალკე განხილულია რემონტის შემდეგ ტრანსფორმატორის აქიუტი ნაწილის ზედაპირიდან და მყარი იზოლაციის მოცულობიდან ზეთის დაძველების პროდუქტების მოცილების აქტუალობა და მეთოდები. ზოგადად აღნიშნულია, რომ დაძველების პროდუქტები აუარესებენ ახალი და რეგენირებული ზეთის თვისებებს, მაგრამ ზეთის მახასიათებლების რაოდენობრივი ან თვისობრივი ცვლილება განხილული არ არის.

3. Цурпал С.В. Причины повреждаемости и меры по повышению надежности мощных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов „Тезисы

докладов X междунар. науч.-техн. конф. „Трансформаторостроение-200” 19-21 сент. 2000г.; Запорожье. По ЗТВ. გვ. 122–126.

ნაჩვენებია, რომ ტრანსფორმატორის ზეთის მინარევები არა მარტო ზეთის საექსპლუატაციო მახასიათებლებს აუარესებს, არამედ მყარი იზოლაციის მახასიათებლების გაუარესების ერთ–ერთი მიზეზია და ნაწილობრივი განმუხტვების დაწყებას უწყობს ხელს. საბოლოოდ ავარიის განმაპირობებელ ფაქტორს წარმოადგენს.

4. Анализ причин повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования//Богомолов В.С., Касаткина Т.Е., Кустов С.С. и др. //Вестник ВНИИЭ. 1997, გვ. 25–32.

განხილულია ტრანსფორმატორების დაზიანების მიზეზები, როგორც აქტიურ ნაწილში წარმოქმნილი დეფექტებით, ასევე ზეთის დაძველებით, კერძოდ დაძველების პროდუქტებით მყარი იზოლაციის დიელექტრიკული დანაკარგების ზრდით და წინააღმდეგობის შემცირებით. ნაჩვენებია ტენის გავლენა ზეთის ელექტროსაიზოლაციო თვისებებზე.

5. Вайда Д. Исследования повреждений изоляции „Энергия” М. 1968, გვ. 395.

განხილულია მაღალი ძაბვის ელექტრომოწყობილობების საიზოლაციო სისტემაში დეფექტების წარმოქმნის მიზეზები და განვითარების პირობები. ნაჩვენებია ზეთის მახასიათებლების გავლენა საიზოლაციო სისტემის საერთო მდგომარეობაზე.

მნიშვნელოვანი ყურადღება აქვს დათობილი საიზოლაციო სისტემაში მიმდინარე ელექტროფიზიკურ მოვლენებს და მინარევების გავლენა ამ პროცესებზე. აღნიშნულია დაძველებული ზეთის გავლენა საიზოლაციო სისტემის საერთო მდგომარეობაზე და მიკრო და მაკრო დეფექტების განვითარებაზე. დასმულია ზეთის მახასიათებლების უწყვეტი კონტროლის სისტემების გამოყენების საკითხი.

6. Филиппин В.Я., Туткевич А.С. Монтаж силовых трансформаторов: „Энергоиздат”. М. 1981, გვ. 530

ნაჩვენებია ტრანსფორმატორის ზეთის გავლენა ელექტრომოწყობილობების საექსპლუატაციო მახასიათებლებზე და ზეთის საექსპლუატაციო მომზადების ხარისხზე.

7. Объем и нормы испытаний электрооборудования – 6-е изд. перераб. и доп. РД 34.45-51.300-97. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2001.

მოცემულია ტრანსფორმატორის საექსპლუატაციოდ მომზადებული ახალი და რეგენირებული ზეთის მახასიათებლების ნორმები. აქვე მოყვანილია ამ მახასიათებლების საექსპლუატაციო და ექსპლუატაციაში ზღვრული დასაშვები მნიშვნელობები.

მნიშვნელოვანი ყურადღება აქვს დათმობილი საექსპლუატაციო ზეთის სისუფთავის კლასის დადგენას, ზეთის ტენშემცველობის და წყალში ხსნადი მჟავების და ტუტეების არსებობას საექსპლუატაციო ზეთში. ასევე განხილულია ზეთის მჟავური რიცხვის განსაზღვრა და მისი ზღვრული დასაშვები მნიშვნელობა.

8. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. М. „Энергоатомиздат”. 1988, გვ. 125.

განხილულია მაღალი ძაბვის მოწყობილობების საიზოლაციო სისტემის კონტროლის მეთოდების ფიზიკური საფუძვლები. ნაჩვენებია საიზოლაციო სისტემის მახასიათებლებზე ტრანსფორმატორის ზეთის მდგომარეობის გავლენა. ზეთის დაძველების პროდუქტებით მყარი იზოლაციის მახასიათებლების გაუარესება. ზეთის დაძველებით წარმოქმნილი შლამის და ნალექის გავლენა ბარიერული იზოლაციის მდგომარეობაზე.

9. Литштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М. „Энергоатомиздат”. 1993, გვ. 295.

განხილულია ტრანსფორმატორის ზეთის მიღების მეთოდები და მახასიათებლები. ზეთის დაძველების მიზეზები და დაძველების პროდუქტების წარმოქმნის მექანიზმები.

დაძველების პროდუქტების გავლენა ტრანსფორმატორის ზეთის ფიზიკურ, ელექტრულ და ქიმიურ მახასიათებლებზე. აღწერილია ზეთის დაძველების სხვადასხვა მექანიზმები და დაძველების პროცესის

მიმდინარეობაზე ტემპერატურის, ელექტრული ველის და ტენის გავლენა. აქვე ნაჩვენებია ტრანსფორმატორის დასამზადებლად გამოყენებული ლითონების კატალიზატორული როლი ზეთის დაძველების პროცესზე, რის შედეგადაც მეტალ-ორგანული შენაერთები წარმოიქმნება.

მეტალ-ორგანული შენაერთების შედგენის მექანიზმი მყარი იზოლაციის მოცულობაში და ცელულოზის მოლეკულის დესტრუქციის მექანიზმი.

10. Брай И.В. Регенерация трансформаторных масел. М. „Химия”, 1972. გვ. 164.

აღწერილია ტრანსფორმატორის დაძველებული ზეთის რეგენერაციის ფიზიკური და ქიმიური მეთოდები. აქვე განხილულია დაძველების პროდუქტების სტრუქტურა და ქიმიური შემადგენლობა. ნაჩვენებია ზეთის რეგენერაციის ხარისხზე დაძველების პროდუქტების შემადგენლობის გავლენა.

11. Ивашев В.В. Ремонт трансформаторов. „Энергоатомиздат”. М. 1989, გვ. 225.

განხილულია მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორების რემონტის მეთოდები, მყარი იზოლაციის შრობის და ზეთის დაძველების პროდუქტებიდან გასუფთავების საშუალებები. აღწერილია ზეთის დაძველების პროდუქტების მყარი იზოლაციის და აქტიური ნაწილის ზედაპირიდან ახალი ცხელი ზეთის ჩამორეცხვის მეთოდები.

12. Мусаэлян Э.С. Наладка и испытание электрооборудования электростанций и подстанций. „Энергоатомиздат”. М. 1986, გვ. 495.

ზოგადად ნაჩვენებია დაძველებული ზეთის გავლენა ელექტრომოწყობილობის საიზოლაციო სისტემის მდგომარეობაზე და დაძველების პროდუქტებით ზეთის მახასიათებლების გაუარესების მექანიზმები.

2. შედეგები და მათი განსჯა

მიღებულმა შედეგებმა გამოავლინა, რომ ტრანსფორმატორის ახალი ან რეგენირებული ზეთის თვისებებზე მნიშვნელოვან გავლენას

ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტები ახდენს, რომლებიც რემონტის პროცესში ტექნოლოგიური ზეთით რეცხვისას მცირე რაოდენობით ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ზედაპირზე რჩება ან ექსპლუატაციის პერიოდში მყარი იზოლაციის მოცულობაში შეაღწია და ახალ ზეთში თანდათანობით იხსნება.

აღნიშნული მინარევები საექსპლუატაციო ნორმის ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობამდე ამცირებენ ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის, კუთრი წინაღობის და ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდეებს, ხოლო დიელექტრიკულ დანაკარგებს, მექანიკური მინარევების რაოდენობას და ფარდობით დიელექტრიკულ შეღწევადობას საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნის ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობაზე მეტად ზრდიან:

გამოვლინდა ახალი ზეთის თვისებებზე მაღალი ელექტროგამტარობის მქონე გრაფიტის ნაწილაკების გავლენა, კერძოდ ერთი და იგივე რაოდენობის შემთხვევაში გრაფიტის ნაწილაკები ორჯერ უფრო აუარესებენ ზეთის თვისებებს, ვიდრე ზეთის დაძველების პროდუქტები, რაც მათი მაღალი ელექტროგამტარობით აიხსნება.

საექსპლუატაციოდ მომზადებული ახალი, საშუალო ხარისხის ზეთი *T-1500* და საუკეთესო თვისებების მქონე *Nytro 11GS* და რეგენირებული *T-1500* მარკის ზეთების ტენშემცველობა 10 ppm არ აღემატებოდა და სრულებით აკმაყოფილებდა საექსპლუატაციოდ მომზადებული ზეთის მოთხოვნებს. ცდების მიმდინარეობისას ტენშემცველობა არ იცვლებოდა, ამის გამო მიღებულ შედეგებზე ზეთის ტენშემცველობის გავლენას არ ახდენდა.

დადგენილია მინარევების რაოდენობის გაზრდით ახალი ზეთის რეფრაქციის კოეფიციენტის და სიმკვრივის ზრდა:

გამოვლინდა, ახალი ზეთის თვისებებზე ზეთის დაძველების პროდუქტების გავლენის კომპლექსური შესწავლის მიზნით ზეთის დაძველების პროდუქტების ელექტრული და ფიზიკური თვისებების შესწავლის აუცილებლობა, რაც ცალკე შესასწავლ საკითხს წარმოადგენს.

3. ექსპერიმენტული ნაწილი

გამოკვლეული იქნა ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტების გავლენა ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთის ელექტრულ და ფიზიკურ მახასიათებლებზე, კერძოდ გამრღვევი ძაბვის, დიელექტრიკული დანაკარგების, ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის და კუთრი წინაღობის სიდიდეებზე. აგრეთვე ფიზიკური მახასიათებლებიდან, ზედაპირულ დაჭიმულობაზე, რეფრაქციის კოეფიციენტზე და რა თქმა უნდა, მექანიკური მინარევების რაოდენობაზე.

საექსპლუატაციოდ მომზადებულ ახალ $T-1500$ და *Nytro 11GS* და რეგენირებულ $T-1500$ მარკის ზეთებში სხვადასხვა სახის მინარევების შეტანით. ზეთების დიელექტრიკული დანაკარგების, კუთრი წინაღობის და ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის სიდიდეები 20° , 50° , 70° და 90° ტემპერატურებზე ისაზღვრებოდა. ყველა ამ ტემპერატურებზე დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდით აღნიშნული პარამეტრების გაუარესებას ჰქონდა ადგილი.

ზეთების თვისებებზე მინარევების ელექტროგამტარობის გავლენის შესწავლის მიზნით, ზეთებს მაღალი ელექტროგამტარობის მქონე გრაფიტის (ნახშირის) წვრილდისპერსიული ფხვნილი ემატებოდა.

ტრანსფორმატორის ზეთის ტენშემცველობის გავლენის გამორიცხვის მიზნით, მინარევების ტენშემცველობა საკვლევი ზეთის ტენშემცველობამდე მინარევების ვაკუუმში შრობით მცირდებოდა.

რადგან დასახული მიზანი ტრანსფორმატორის საექსპლუატაციოდ მომზადებული ახალი ზეთის თვისებების შესწავლას ეხებოდა, ამის გამო ყველა მახასიათებლის განსაზღვრა და შეფასება საექსპლუატაციო ნორმის და სტანდარტების მოთხოვნის მიხედვით ჩატარდა.

ცდებში გამოყენებული ყველა ხელსაწყო და დანადგარი მეტროლოგიურად შემოწმებული იყო და პერიოდულად ხელსაწყო-დანადგარებს ლაბორატორიის პირობებში კალიბრება უტარდებოდა.

საცდელ ზეთში ორივე სახის მინარევები მექანიკური არევით სრულ გახსნამდე იხსნებოდა.

ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტები გამოიყო 110 კილოვოლტიანი ტრანსფორმატორის საექსპლუატაციოდ უვარგისი ზეთისგან, ხოლო გრაფიტის ფხვნილი დამზადდა ელექტროტექნიკური გრაფიტის ღეროებისგან, ფხვნილის 70 მიკრონის უჯრედების მქონე საცერში გატარებით, რაც ზომებით ზეთის მოლეკულების დაშლის შედეგად წარმოქმნილი გრაფიტის ნაწილაკებს შეესაბამება.

ტრანსფორმატორის ზეთის ზოგიერთი მახასიათებლების განსაზღვრა მაღალი ძაბვით წარმოებდა, ამის გამო დაცული იყო მაღალი ძაბვის დანადგარებთან მუშაობის უსაფრთხოების წესების მოთხოვნები. მაღალი ძაბვის ყველა დანადგარი აღჭურვილი იყო დამცავი ბლოკირებით, ხოლო კორპუსი ელექტრულად დაკავშირებული იყო დამიწების კონტურთან.

თავი 1. ამოცანის დასმა

1.1. ტრანსფორმატორის ზეთის მიღება და დანიშნულება

ტრანსფორმატორის ზეთი ნავთობის გამოხდის პროდუქტია. გამოხდის ტემპერატურა 300°C -დან 400°C -მდე იცვლება. მიღებულ პროდუქტს სხვადასხვა სახის გაწმენდას უტარებენ და შემდეგ დაჟანგვის საწინააღმდეგო მისართს - იონოლს უმატებენ [1].

გამოხდის შემდეგ გამოყენებული გაწმენდის მეთოდის მიხედვით ტრანსფორმატორის ზეთები იყოფა:

1. მჟავურ-ტუტოვანი გაწმენდით მიღებულ ზეთებად, რაც გამოხდილი ზეთის კონცენტრირებული გოგირდმჟავით დამუშავებაში გამოიხატება. ნარჩენი მჟავას ზეთისგან მოსაცილებლად, ზეთს ტუტით ამუშავებენ და შემდეგ წყლით გარეცხვას და შრობას უტარებენ;
2. სელექციური (არჩევითი) გამხსნელით გაწმენდა. ამ შემთხვევაში გამხსნელი ისეა შერჩეული, რომ ის ზეთის არასასურველ მინარევებს ხსნის და ხსნართან ერთად გამოაქვს;
3. ჰიდროგაწმენდით - წყალბადით დამუშავებით მიღებული ზეთები. კატალიზატორისა და $400-425^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურის მქონე ზეთში 40 ატმოსფეროს წნევით წყალბადი შეჰყავთ, რომელიც ზეთის არასასურველი მინარევების ჰიდროკრეკინგს ახდენს;
4. ადსორბენტებით გაწმენდილი ზეთის მიღება გამოხდილი ფრაქციის ისეთი თიხებით დამუშავებით ხდება, რომლებიც მინარევების ადსორბციას ახდენს და გაფილტვრის შემდეგ ზეთიდან ამ მინარევებთან ერთად გამოიყოფა [2].

გაწმენდის მიზანია გამოხდის შემდეგ ისეთი მინარევების მოცილება, რომლებიც ზეთის მდგრადობას (სტაბილურობას) მოლეკულური ჟანგბადის მიმართ და ელექტროსაიზოლაციო თვისებებს ამცირებენ. ასეთ მინარევებს უჯერი ნახშირწყალბადები, აზოტისა და გოგირდის

შენაერთები, ასფალტფისოვანი ნივთიერებები, მყარი ნახშირწყალბადები და სხვა ნაერთები მიეკუთვნება.

ტრანსფორმატორის ზეთი სხვადასხვა სახის ნახშირწყალბადების ნარევის წარმოადგენს (ცხრ. 1.1.), რომლის სტრუქტურულ-ჯგუფურ შედგენილობაში არომატული, ნაფთენური და პარაფინული ნახშირწყალბადები შედის.

ტრანსფორმატორის ზეთის შედგენილობაში მყოფი პარაფინული და ციკლოპარაფინული ნახშირწყალბადები (C_p) ნაჯერ ნახშირწყალბადებს წარმოადგენს (ზოგადი ფორმულა C_nH_{2n+2}), ე.ი. მათ ნახშირბადის ატომებს შორის ორმაგი კავშირი არ გააჩნიათ, რაც მაღალ მდგრადობას და დაბალ ქიმიურ აქტივობას განაპირობებს.

ცხრილი 1.1. ნახშირწყალბადები ტრანსფორმატორის ზეთში

| № | დასახელება | შემცველობა % |
|----|--|--------------|
| 1. | პარაფინები | 40-60 |
| 2. | ნაფთენები | 35-55 |
| 3. | არომატული ნახშირწყალბადები | 2-20 |
| 4. | ასფალტ-ფისოვანი ნივთიერებები | <1 |
| 5. | გოგირდშემცველი ნაერთები | <1 |
| 6. | აზოტშემცველი ნაერთები | <0,8 |
| 7. | დაჟანგვის საწინააღმდეგო მისართი (იონოლი) | 0,2-0,5 |

პარაფინული ნახშირწყალბადების დიდი შემცველობა ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრულ თვისებებს აუმჯობესებს, მაგრამ დაბალტემპერატურული თვისებების გაუარესებას იწვევს. პარაფინულ ნახშირწყალბადებს ფეთქის მაღალი ტემპერატურა გააჩნია და მათი დიდი შემცველობა ზეთის ფეთქის ტემპერატურას ზრდის, მაგრამ ისინი ლითონის ზედაპირზე ორმაგ შრეს წარმოქმნის, რომლის ერთი ნაწილი ლითონის ზედაპირს უძრავად ეკვრის, ხოლო მეორე შედარებით მოძრავია. ეს კი ზეთით ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის გაცივებას აფერხებს.

ნაფთენური ნახშირწყალბადები (C_H) ტრანსფორმატორის ზეთის ძირითად ნაწილს წარმოადგენს (ზოგადი ფორმულა C_nH_{2n}). ისინი საუკეთესო დიელექტრიკული თვისებებით ხასიათდება, გააჩნია $tg\delta$ -ს

ძალიან მცირე მნიშვნელობა, რომელიც ტემპერატურის მიხედვით თითქმის არ იცვლება, მაგრამ ქიმიურად არასტაბილურები არიან და ტემპერატურის და ელექტრული ველის მოქმედებით ადვილად შედის რეაქციაში ჟანგბადსა და წყლის მოლეკულებთან, ე.ი. ადვილად ძველდებიან.

არომატული ნახშირწყალბადები (C_H) ტრანსფორმატორის ზეთის თვისებებზე საგრძნობ გავლენას ახდენს (ზოგადი ფორმულა C_nH_{2n-2}). არომატული ნახშირწყალბადები როგორც ნეიტრალური, ასევე დიპოლური მოლეკულებისაგან შედგება.

ნეიტრალური მოლეკულების მქონე არომატული ნახშირწყალბადები ტრანსფორმატორის ზეთში შემავალ ყველა ნახშირწყალბადებზე მეტად სტაბილურია. დიპოლური მოლეკულების მქონე არომატული ნახშირწყალბადები კი ზეთის $tg\delta$ -ს ზრდის და ტენშემცველობას ადიდებს, ხოლო ექსპლუატაციისას ადვილად ძველდება და დიდი რაოდენობით შლამს წარმოქმნის.

აღნიშნულის გარდა, ტრანსფორმატორის ახალი ზეთი სხვა ნახშირწყალბადებსაც შეიცავს, რომელთა საერთო რაოდენობა გაწმენდის მიუხედავად 0,1%-მდეა. ასეთი ნახშირწყალბადებია: მერკაპტანები, გოგორდის შენაერთები, მყარი პარაფინები, ასფალტ-ფისოვანი ნაერთები და სხვა. ტრანსფორმატორის ზეთის დამძველების შედეგად მათი შემცველობა იზრდება.

ამ ნითვიერებების რაოდენობა ტრანსფორმატორის ზეთის ფერს განსაზღვრავს. თუ ისინი მცირე რაოდენობისაა, მაშინ ზეთი ღია, თითქმის უფეროა, ხოლო მათი რაოდენობის გაზრდით ზეთი უფრო მუქი ფერის ხდება, ე.ი. ფერი ზეთის დამძველების შესახებ გარკვეულ ინფორმაციას იძლევა.

ტრანსფორმატორის ზეთი ნეიტრალურ დიელექტრიკს წარმოადგენს, მაგრამ ელექტრული ველის და ტემპერატურის მოქმედებით რეაქციაში შედის სპილენძთან, რკინასთან, კალასთან და ტრანსფორმატორის ავზში

მყოფ სხვა ლითონებთან, რის შედეგადაც ლითონორგანული შენაერთები წარმოიქმნება. ეს კი ზეთის *tgδ* -ს გაზრდას იწვევს.

ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში ტრანსფორმატორის ზეთს ძირითადად ორი ფუნქცია გააჩნია, რომელთაგან ძირითადია მყარი იზოლაციის ელექტრული თვისებების გაძლიერება. ელექტროტექნიკური მოწყობილობის მყარი იზოლაცია ცელულოზის ნაწარმს - საკაბელო ქაღალდს და ელექტროტექნიკურ მუყაოს წარმოადგენს. ისინი ბოჭკოვან მასალებს მიეკუთვნებიან და ბოჭკოებს შორის სივრცე ჰაერით არის შევსებული, რომელიც დაბალი საიზოლაციო თვისებით ხასიათდება. ქაღალდის და მუყაოს ელექტრული სიმტკიცის გაზრდის მიზნით მათ ტრანსფორმაციის მაღალი ელექტრული სიმტკიცის ზეთით ჟღენთავენ. ამისთვის ზეთით შევსებამდე ელექტროტექნიკური მოწყობილობიდან ჰაერს გამოდევნიან (ვაკუუმირებას უტარებენ) და შემდეგ წინასწარ მომზადებული ახალი ზეთით ავსებენ. ამით მათი ელექტროსაიზოლაციო თვისებები მნიშვნელოვნად უმჯობესდება, მაგრამ თუ ზეთის ელექტრული თვისებები დაბალია, მაშინ საიზოლაციო თვისებების გაუმჯობესება შედარებით ნაკლებია.

ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში ზეთის მეორე მნიშვნელოვანი ფუნქციაა აქტიურ ნაწილში გამოყოფილი სითბოს კონვექციის გზით გარემოზე გადაცემა. ე.ი. აქტიური ნაწილის გაცივება [3].

ამ უკანასკნელი ფუნქციის განხორციელებაში ზეთის ელექტროსაიზოლაციო თვისებებს მნიშვნელობა არ აქვს. აქ ძირითადია ზეთის სიბლანტე და თბური თვისებები. დაძველების შედეგად ზეთის სიბლანტე იზრდება და თბური თვისებების გაუარესებას აქვს ადგილი [4].

ამგვარად დაძველების პროდუქტები ზეთის საიზოლაციო თვისებების გაუარესებასთან ერთად სხვა მახასიათებლების შემცირებას იწვევს.

მდგომარეობის მიხედვით ტრანსფორმატორის ზეთი შემდეგ სახეებად იყოფა [5]:

1. ახალი ან ნედლი ზეთი, რომელსაც ზოგჯერ გამოუყენებელ ზეთს უწოდებენ. ის ნავთობგადამამუშავებელმა ქარხანამ დაამზადა და შესაბამისი მომზადების შემდეგ მისი ექსპლუატაციაში გამოყენება შესაძლებელია;
2. საექსპლუატაციოდ მომზადებული ახალი ზეთი, ის ნედლი ზეთის სპეციალური მომზადების შემდეგ მიიღება. მისი მომზადების პროცესს და მახასიათებლების მნიშვნელობას ელექტრომოწყობილობის ძაბვის კლასი განაპირობებს;
3. საექსპლუატაციო ზეთი. ის ელექტრომოწყობილობაში ექსპლუატაციაში იმყოფება და მისი მახასიათებლები საექსპლუატაციო ზეთის ნორმის მოთხოვნებს აკმაყოფილებს;
4. დაძველებული ზეთი. ასეთი ზეთის ერთი ან რამოდენიმე მახასიათებლების მნიშვნელობა, საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნებს არ აკმაყოფილებს. თუ ასეთი ზეთი ელექტრომოწყობილობაში იმყოფება, მისი ექსპლუატაცია დაუშვებელია. ის ახლით უნდა შეიცვალოს ან აღდგენა ჩაუტარდეს;
5. რეგინერებული (აღდგენილი) ზეთი. ის დაძველებული ზეთისგან დაძველების პროდუქტების მოცილების შემდეგ მიიღება და მას ექსპლუატაციაში იყენებენ;
6. როდესაც ზეთის მახასიათებლები იმდენად გაუარესებულია, რომ მისი რეგენერაცია შეუძლებელია ან საქარხნო პირობებში შეუძლებელია, ზეთს უტილიზაციას უტარებენ ან ნავთობგადამამუშავებელ ქარხანაში აგზავნიან.

1.2. ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლები

ტრანსფორმატორის ყველა სახის და მარკის ზეთის ფიზიკური, ელექტრული ან ქიმიური მახასიათებლები გააჩნიათ, რომელთა მნიშვნელობები ზეთის მდგომარეობის მიხედვით იცვლება.

ტრანსფორმატორის ზეთის ფიზიკური მახასიათებლებიდან აღსანიშნავია:

1. ტრანსფორმატორის ზეთის სიმკვრივე, გვიჩვენებს 1მ^3 მოცულობის მქონე ზეთის წონას კგ-ში. როგორც წესი, ნავთობპროდუქტების სიმკვრივე დენსიმეტრით 20°C ტემპერატურაზე იზომება და D_{20} -ით აღნიშნავენ. განსხვავებულ ტემპერატურაზე გაზომვის შემთხვევაში მიღებული D_t სიდიდით D_{20} -ის გამოსაანგარიშებლად მენდელეევის ფორმულას იყენებენ [6].

$$D_{20} = D_t[1 + \alpha(t - 20)], \quad (1.1)$$

სადაც α ტრანსფორმატორის ზეთის მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი

$$\alpha \approx 0,00066 \text{ გრად.}^{-1} \quad (1.2)$$

ტრანსფორმატორის ზეთის სიმკვრივე $800-890\text{კგ/მ}^3$ ფარგლებში იცვლება. ზედა ზღვარი იმ პირობითაა შერჩეული, რომ დაბალ ტემპერატურაზე ზეთში ყინულის წარმოქმნისას, ყინული ზეთში ზედაპირზე არ უნდა ამოტივტივდეს.

ზეთის სიმკვრივე ქიმიური შემადგენლობით არის განპირობებული და ზეთის მაიდენტიფიცირებელი პარამეტრია. რაც მეტია ზეთში არომატული და ნაფთენური ნახშირწყალბადები, მით მეტია სიმკვრივე. ექსპლუატაციაში ზეთის სიმკვრივის ზრდა დამველების ნიშანია.

2. ტრანსფორმატორის ზეთის ფერი მასში ასფალტ-ფისოვანი ნაერთების არსებობითაა განპირობებული. რაც კარგადაა გაწმენდილი ზეთი, მით ღია ფერისაა. ტრანსფორმატორის ახალი ზეთის ფერი კოლორომეტრის საშუალებით განისაზღვრება და $0,5-1,5$ ბალამდე იცვლება [7].

ექსპლუატაციის განმავლობაში ზეთის ფერის მატება მასში დამველების პროდუქტების არსებობითაა განპირობებული. ტრანსფორმატორის ძლიერდამველებული ზეთი მუქ ფერს იღებს და $4-5$ ბალს აღწევს.

3. ტრანსფორმატორის ზეთის სიბლანტე დამოკიდებულია ტემპერატურასა და ზეთის სტრუქტურულ შედგენილობაზე. თუ ზეთი

დიდი სიბლანტისაა, ის ზეთსავალ არხებში ძნელად მოძრაობს და გაცივების ეფექტიც ნაკლებია.

ექსპლუატაციის განმავლობაში ზეთის სიბლანტის მატება ზეთში მინარევების წარმოქმნასა და დაძველებაზე მიუთითებს [8].

4. ტრანსფორმატორის ზეთის სითბოგამტარობას და სითბოტევადობას ზეთის შედგენილობა და სიმკვრივე განსაზღვრავს. ისინი მნიშვნელოვანია ზეთის გაცივების უნარის შესაფასებლად, საექსპლუატაციო ზეთებისათვის არ განისაზღვრება.

5. ტრანსფორმატორის ზეთის ფეთქის ტემპერატურა ($t_{ფ}$) სპეციალურ დახურულ ტიგელში განისაზღვრება. ახალი ზეთისთვის მისი სიდიდე 135°C -ს აღემატება. ფეთქის ტემპერატურა ზეთის ცალკეული ფრაქციების აორთქლების უნარითაა განპირობებული და გვიჩვენებს იმ ტემპერატურას, რომელზეც ზეთის ორთქლის წნევა ატმოსფერულ წნევას აღემატება. რაც უფრო კარგად არის გაწმენდილი ზეთი ადვილად აორთქლებადი ფრაქციებისგან, მით მეტია $t_{ფ}$.

ექსპლუატაციისას $t_{ფ}$ -ს შემცირება ზეთის დაძველებაზე და მასში ადვილად აორთქლებადი ფრაქციების წარმოქმნაზე მიუთითებს [9].

6. ტრანსფორმატორის ახალი ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა 40-50კნ/მ და ზეთში პოლარული ნაწილაკების არსებობითაა განპირობებული. ექსპლუატაციისას ზედაპირული დაჭიმულობის შემცირება ზეთის დაძველების დაწყებაზე მიუთითებს. მისი შემცირება ტრანსფორმატორის ზეთის სხვა მახასიათებლებზე ადრე გამოავლენს ზეთში პოლარული ნაწილაკების წარმოქმნას, ე.ი. ზეთის დაძველების დაწყებას [10].

7. აირშემცველობა, ტენშემცველობა და მექანიკური მინარევების რაოდენობა ტრანსფორმატორის ახალი ზეთისათვის არ განისაზღვრება, რადგან გამოყენების წინ ახალ ზეთს სხვადასხვა სახის დამუშავებას უტარებენ. ეს მახასიათებლები ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისთვისაა მნიშვნელოვანი და ზეთის მდგომარეობის მახასიათებელ პარამეტრებს წარმოადგენს.

8. გარდატეხის მაჩვენებელი (n) სინათლის სხივის სიჩქარის ცვლილებას ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას ახასიათებს და ტრანსფორმატორის ახალი ზეთებისთვის ერთ-ერთ მაიდენტიფიცირებელ პარამეტრს წარმოადგენს, ხოლო გარდატეხის მაჩვენებლის გაზრდა ზეთის დაძველებაზე მიუთითებს.

ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრულ მახასიათებლებს ელექტრული სიმტკიცე, ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა, კუთრი წინაღობა, ვერმანის კოეფიციენტი და დიელექტრიკული დანაკარგები წარმოადგენს.

ზეთის მწარმოებელი ქარხანა ელექტრული პარამეტრებიდან მხოლოდ დიელექტრიკულ დანაკარგებს ითვალისწინებს, ხოლო საექსპლუატაციო ნორმებით ყველა ელექტრული პარამეტრის სიდიდის განსაზღვრა აუცილებელია.

9. ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრული სიმტკიცე სპეციალური ხელსაწყოს საშუალებით სტანდარტულ ელექტროდთა სისტემაში განისაზღვრება, სადაც ელექტროდებს შორის მანძილი 2,5მმ-ის ტოლია. მას ამ შუალედში მოთავსებული ზეთის გამრღვევ ძაბვას ($u_{გაგ}$) უწოდებენ და კილოვოლტებით გამოსახავენ. მისი სიდიდე ენერგომოწყობილობის ძაბვის კლასით არის განსაზღვრული და სპეციალურ ნორმებშია მითითებული [11].

10. ტრანსფორმატორის ზეთის tgd და კუთრი წინაღობა (ρ), ურთიერთდაკავშირებული პარამეტრებია.

ტრანსფორმატორის ახალ ზეთს ტენისა და მინარევების მოცილების შემდეგ 90°C ტემპერატურაზე კუთრი წინაღობის დიდი მნიშვნელობა ($>10^{12}\text{ომმ}$) და tgd -ს მცირე სიდიდე (0,2%) გააჩნია. ექსპლუატაციისას ეს პარამეტრებიც ცვლილებას განიცდის და მათი სიდიდე ელექტრომოწყობილობის მუშა ძაბვის სიდიდის მიხედვით საექსპლუატაციო ნორმებით არის განსაზღვრული [10].

ტრანსფორმატორის ზეთის tgd სიდიდეზე დიდ გავლენას ტენი და მინარევები ახდენს. მინარევებისაგან გაწმენდილი ახალი ზეთის tgd

სიდიდე ტემპერატურის გაზრდით სწორხაზოვნად იზრდება, რაც ელექტროგამტარობის გაზრდითაა განპირობებული.

თუ ტრანსფორმატორის ზეთში მინარევებია, მაშინ t_{gd} შედარებით მეტია, ვიდრე ახალი ზეთის და t_{gd} -ს ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდი არასწორხაზოვანია. ამ დამოკიდებულებაზე t_{gd} მკვეთრი ზრდა იმ მინარევების აქტივაციითაა განპირობებული, რომლებიც ზეთის ელექტროგამტარობას განაპირობებს.

11. ტრანსფორმატორის ახალი ზეთი ნეიტრალურ დიელექტრიკს წარმოადგენს, რომლის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა 20°C ტემპერატურაზე 2,5-ზე ნაკლებია და ტემპერატურის ზრდით სწორხაზოვნად მცირდება. თუ ზეთი ძლიერ დაძველებულია ან დიდი რაოდენობით ტენსა და მინარევებს შეიცავს, მაშინ ϵ , სიდიდე უფრო მეტია, ვიდრე ახალი ზეთის და ტემპერატურის მიხედვით სწორხაზოვნად არ იცვლება [10].

12. ვერმანის კოეფიციენტი ტრანსფორმატორის ზეთში დიპოლური ნაწილაკების არსებობას გამოავლენს და ზეთის ხარისხის შემფასებელი პარამეტრია.

ტრანსფორმატორის ზეთის ქიმიური მახასიათებლებიდან მნიშვნელოვანია მჟავური რიცხვი, წყალში ხსნადი მჟავების რაოდენობა და დაჟანგვის საწინააღმდეგო მისართის - იონოლის შემცველობა.

13. ტრანსფორმატორის ზეთის მჟავური რიცხვი კალიუმის ჰიდროქსიდის (KOH) იმ რაოდენობას გამოსახავს მილიგრამებში, რომლებიც ერთ გრამ ტრანსფორმატორის ზეთში არსებული მჟავური ნაერთების გასანეიტრალებლად საჭირო. მისი განზომილებაა მგრამი $\text{KOH}/1\text{გრამ ზეთზე}$.

ახალი ზეთი ძალიან მცირე რაოდენობის მჟავურ ნაერთების შეიცავს, შესაბამისად, მისი მჟავური რიცხვიც მცირეა. ექსპლუატაციაში ზეთის დაძველების შედეგად მჟავური რიცხვი იზრდება და მისმა სიდიდემ შესაძლებელია „ზღვრულ დასაშვებ“ მნიშვნელობასაც (0,25მგრამი

KOH /1გრამ ზეთზე) გადააჭარბოს. ასეთი ზეთის გამოყენება ყოველად დაუშვებელია, რადგან მჟავე ზეთი მყარ იზოლაციას აზიანებს.

ტრანსფორმატორის ახალ ზეთში წყალში ხსნადი მჟავეები თითქმის არ არის, მაგრამ ექსპლუატაციაში ზეთი დაჟანგვის შედეგად წარმოიქმნება. თუ წარმოქმნილი მჟავების მოლეკულაში ნახშირბადის ატომების რიცხვი ოთხს არ აღემატება, მაშინ ისინი წყალში ხსნადებია, ასეთებია: ძმარმჟავა, ჭიანჭველმჟავა, ერბომჟავა და სხვა. ისინი ელექტრული ველისა და ტემპერატურის მოქმედებით მყარ იზოლაციას აზიანებს.

15. ტრანსფორმატორის ზეთში დაჟანგვის საწინააღმდეგო მისართი ჟანგვითი პროცესების შესაჩერებლად ან დაჟანგვით წარმოქმნილი პროდუქტების ისეთ მდგომარეობაში გადასაყვანად გამოიყენება, როდესაც ისინი ზეთის თვისებებზე გავლენას ვერ ახდენს.

1.3. მინარევები ტრანსფორმატორის ზეთში

ტრანსფორმატორის ზეთში მყოფ ყველა ნივთიერებას, რომელიც ზეთის თვისებების გაუარესებას იწვევს ტრანსფორმატორის ზეთის მინარევებს უწოდებენ. ისინი ზეთის მდგომარეობას განსაზღვრავს და მათი კლასიფიკაცია, წარმოშობის, აგრეგატული მდგომარეობის და ელექტროგამტარობის მიხედვით წარმოებს [12].

წარმოშობის მიხედვით მინარევები შეიძლება იყოს ნავთობისგან ტრანსფორმატორის ზეთის მიღების ტექნოლოგიით განპირობებული ან ზეთში ექსპლუატაციისას წარმოქმნილი.

ტრანსფორმატორის ახალი - ნედლი ან რეგენირებული ზეთი ექსპლუატაციის დაწყებამდე სათანადო მომზადებას განიცდის და დეგაზაციის და ფილტრაციის გზით მინარევებს იმ დონემდე ამცირებენ, რომ ის ახალი ზეთის საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნას აკმაყოფილებს. თვლიან, რომ ასეთი ზეთი სუფთა და მცირე რაოდენობით მინარევებს შეიცავენ. ისინი ზეთის თვისებებზე უმნიშვნელო გავლენას ახდენენ.

როდესაც მინარევები ექსპლუატაციაში ზეთის დაძველებით წარმოიქმნება, მათ დაძველებით წარმოქმნილ მინარევებს უწოდებენ. გარკვეულ ზღვრამდე ისინი ზეთის თვისებებს ნაკლებად ცვლიან.

აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით მინარევები აირად, თხევად და მყარ (მექანიკურ) მინარევებად იყოფიან.

აირად მინარევებს ზეთში გახსნადი აირები წარმოადგენენ. ცნობილია, რომ ტრანსფორმატორის ზეთში აირები კარგად იხსნებიან და მათი ელექტრული სიმტკიცე ზეთის ელექტრულ სიმტკიცესთან შედარებით 10-ჯერ ნაკლებია [3].

ტრანსფორმატორის ზეთში გახსნილ აირებს ძირითადად ჰაერი მიეკუთვნება, რომელიც თავისუფალი სუნთქვის მქონე ელექტრომოწყობილობაში და ჰერმეტიკულ მოწყობილობებში ჰერმეტიზაციის დარღვევის შემთხვევაში ატმოსფეროდან აღწევს. ის ძირითადად აზოტს (N_2), ჟანგბადს (O_2) და ნახშირორჟანგს (CO_2) შეიცავს. ამ აირებიდან ყველაზე ნაკლები ელექტრული სიმტკიცე ნახშირორჟანგს გააჩნია, მაგრამ ჟანგბადი სხვა ფაქტორებთან ერთად ტრანსფორმატორის ზეთის დაჟანგვას და ქაღალდის დაძველებას უწყობს ხელს. აზოტი კი ინერტულია და ზეთის თვისებებს თითქმის არ ცვლის [13].

ტრანსფორმატორის ზეთში თხევად მინარევს წყალი წარმოადგენს, რომლის სიმკვრივე ზეთის სიმკვრივეზე მეტია და ზეთში ცუდად იხსნება, მაგრამ ზეთის ელექტრულ მახასიათებლებზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს. ზეთში გახსნილ წყალს ზეთის ტენზომცველობას უწოდებენ და მას ერთ ტონა ზეთში გახსნილი წყლის გრამებში გამოსახული რაოდენობით (გრ H_2O ტონა ზეთში) ან ppm -ში გამოსახავენ.

ტრანსფორმატორის საექსპლუატაციოდ მომზადებულ ზეთში წყლის რაოდენობა ძალიან მცირეა 10 ppm -ს არ აღემატება, ხოლო ექსპლუატაციისას კი ჰერმეტიკულ მოწყობილობებში 25 გრამამდე იზრდება.

ჰერმეტიკულ ელექტრომოწყობილობებში წყალი ტრანსფორმატორის ზეთის და ელექტროტექნიკური ქაღალდის მოლეკულების დაძველებით

დაშლის შედეგად წარმოიქმნებიან, ხოლო თავისუფალი სუნთქვის მქონე მოწყობილობებში ტენმშთანთქავი მოწყობილობების გაუმართაობის გამო აღწევნ.

ელექტრომოწყობილობის ტრანსფორმატორის ზეთში წყლის მოლეკულები ზეთის მოლეკულებთან ბმულ, მოლეკულებს შორის გახსნილ და მოწყობილობის ავზის ძირში მყოფად იყოფიან. შესაბამისად ასეთ წყალს ბმულ, გახსნილს და თავისუფალ წყალს უწოდებენ [14].

წყლის მოლეკულა ძლიერ დიპოლურია. ის ზეთის მოლეკულებთან დიპოლურ კავშირს ამყარებს, რომლის დასაშლელად დიდი ენერჯიაა საჭირო და ასეთის წყლის გავლენა ტექნიკური სისუფთავის ზეთის თვისებებზე უმნიშვნელოა. ის თავს უაღრესად სუფთა ზეთებში იჩენს.

რადგან წყლის მოლეკულის ზომა ზეთის მოლეკულებს შორის არსებული სივრცის თანაზომადია, ის ამ სივრცეს იკავებს და მოლეკულებს უკავშირდება, მაგრამ ელექტრული ველის მოქმედებით ადვილად გადაადგილდება და ზეთის ყველა ელექტრული მახასიათებლების გაუარესებას იწვევს.

ზეთის ტემპერატურის მიხედვით ბმული და გახსნილი წყალი ერთგვარ თერმოდინამიურ წონასწორობაში იმყოფებიან და გარკვეულ პირობებში ერთი სახიდან მეორეში გადადიან.

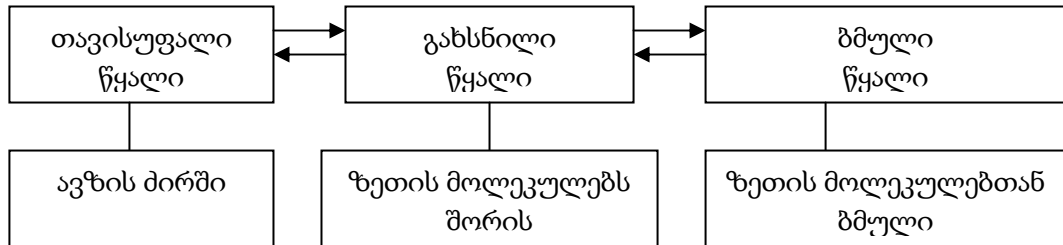
თავისუფალი წყალი ტრანსფორმატორის ზეთის მოლეკულებთან დაკავშირებული არ არის და ის ელექტრომოწყობილობის ავზის ძირშია დაგროვილი და თვალთ ადვილად შესამჩნევია. ზოგჯერ ავზის ძირზე დაგროვილ მყარ მინარევებთან ემულსიას წარმოქმნის.

კაპიტალური რემონტის ჩატარების პროცესში ჰერმეტიკული ელექტრომოწყობილობების ავზის ძირზე ზოგჯერ რამოდენიმე ათეული ლიტრი თავისუფალი წყალი აღმოუჩენიათ [15].

ზეთის ტემპერატურის გაზრდით მასში წყლის მოლეკულების ხსნადობა იზრდება შესაბამისად თავისუფალი წყალი გახსნილში გადადის, ხოლო ტემპერატურის შემცირებისას კი პირიქით. ე.ი. მსგავსად გახსნილი და

ბმული წყლისა თავისუფალ და გახსნილ წყალს შორისაც არსებობს გარკვეული თერმოდინამიური წონასწორობა.

საბოლოოდ შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ტემპერატურის გაზრდით წყლის მოლეკულები შემდეგი სქემით მოძრაობენ (ნახ.1.1).



ნახ. 1.1 წყლის მდგომარეობის ცვლილება ტრანსფორმატორის ზეთში

არსებობს მოსაზრება, რომ თავისუფალი წყალი გარკვეულ პირობებში პირდაპირ ბმულ წყალში გადადის [16], რაც ნაკლებად ცვლის ტრანსფორმატორის ზეთის თვისებებს, მაგრამ მიუთითებს გახსნილი წყლის დიდ რაოდენობაზე.

ტრანსფორმატორის ზეთის ტენშემცველობის განსაზღვრის ყველა არსებული მეთოდი ძირითადად გახსნილი წყლის რაოდენობის დადგენას ითვალისწინებს, ხოლო ბმული წყალი ტენშემცველობაში საერთოდ არ აისახება, ხოლო თავისუფალი წყალი კი ტენშემცველობის განსაზღვრაში ძალიან მცირედ აისახება.

ამასთანავე გასათვალისწინებელია წყლის მოლეკულის კავშირი მყარი მინარევების დიპოლურ მოლეკულებთან [14].

ელექტრული ველის მოქმედებით თხევადი და აირადი მინარევების ნაწილაკები ფორმას ადვილად იცვლიან და ელექტრული ველის გასწვრივ ორიენტაციას იღებენ, ე.ი. დამატებით დიპოლურ მომენტს იძენენ.

ამდაგვარად, თხევადი და აირადი მინარევებიდან ტრანსფორმატორის ზეთის თვისებებზე ყველაზე მნიშვნელოვან გავლენას წყალი ახდენს.

ტრანსფორმატორის ზეთში მყარ მინარევებს ისეთი მინარევები მიეკუთვნება, რომლებიც ზეთში ან წყალში არ იხსნებიან, თუ მათი სიმკვრივე ტრანსფორმატორის ზეთის სიმკვრივის ტოლია, მაშინ ისინი

შეტივტივებული არიან ზეთში, ხოლო მეტი სიმკვრივის ნაწილაკები კი ავზის ძირზე და აქტიური ნაწილაკების ზედაპირზე შლამის სახით დაილექებიან. ზეთის იძულებითი კონვექციის შემთხვევაში ზეთის ნაკადი მათ წარიტაცებს და ზეთთან ერთად მოძრაობენ.

ტრანსფორმატორის ზეთში მყარ მინარევებს ლიტერატურაში მექანიკურ მინარევებს უწოდებენ.

ელექტროგამტარობის მიხედვით ისინი ელექტროგამტარ და დიელექტრიკულ მასალებად, ხოლო წარმოშობის მიხედვით ზეთის ან მყარი იზოლაციის დამველებით წარმოქმნილს ან ზეთის თანმხლებ მინარევებად იყოფიან.

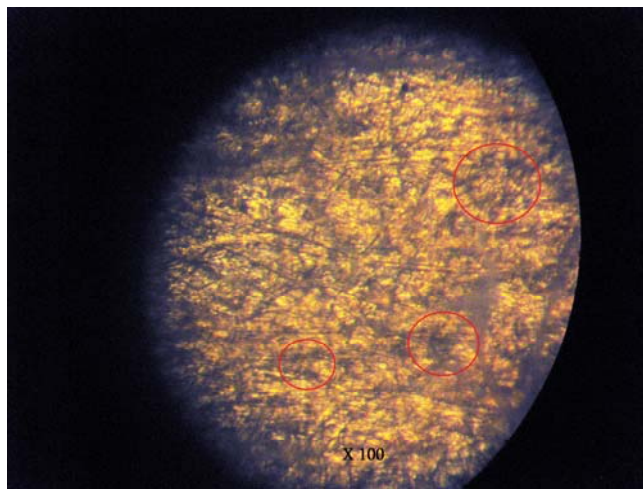
დამველების შედეგად წარმოქმნილი მყარი პროდუქტები, როგორცაა ზეთში უხსნადი მეტალორგანული შენაერთები, უხსნადი ფისები და სხვა. შლამის სახით (ნახ. 1.2) ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ზედაპირთან კოვალენტურ კავშირს ამყარებენ, ზედაპირს მჭიდროდ ეკვრიან და ძირითადად სითბოგადაცემის კოეფიციენტს ამცირებს, ხოლო მყარი იზოლაციის ზედაპირზე დაგროვებისას ნაწილობრივი განმუხტვების განვითარების ხელსაყრელ პირობებს ქმნიან. ელექტრული ველის მოქმედებით ისინი მყარი იზოლაციის მოცულობაშიც აღწევს (ნახ. 1.3) და მისი ელექტროსაიზოლაციო თვისებების მნიშვნელოვან გაუარესებას იწვევენ.

ზეთში ხსნადის დამველების პროდუქტები მნიშვნელოვნად ცვლის, როგორც ზეთის ფიზიკურ, ასევე ელექტრულ და ქიმიურ მახასიათებლებს. ამ მოვლენის მაჩვენებელია საექსპლუატაციო ზეთის ფერის მნიშვნელოვანი ცვლილება (ნახ. 1.4).

ტრანსფორმატორის მყარი იზოლაციის, კერძოდ ელექტროტექნიკური ქაღალდის ან მუყაოს ბოჭკოები დამველების შედეგად ზეთში მცირე რაოდენობით გადადის. ისინი რა თქმა უნდა საიზოლაციო თვისებების არიან. მაგრამ დიპოლური აგებულებით ხასიათდებიან. მცირე ტენშემცველობის ზეთის ელექტრულ თვისებებს პრაქტიკულად ვერ ცვლის,



ნახ. 1.2. მყარი მინარევები ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ზედაპირზე



ნახ. 1.3. მყარი იზოლაციის მოცულობაში შეღწეული ზეთის დაძველების პროდუქტები



ნახ. 1.4. დაძველების შედეგად ზეთის ფერის ცვლილება
ა - ახალი, ბ - სუსტად და გ - ძლიერ დაძველებული

მაგრამ თუ ზეთის ტენშემცველობა მაღალია, მაშინ მათი წყლის მოლეკულები უკავშირდება და ელექტრულ ველში მოხვედრისას ისინი წყლის მოლეკულებთან ერთად მაღალი გამტარობის არხს წარმოქმნის, რითაც გარღვევის ხელსაყრელი პირობა იქმნება.

ბოლო წლებში ჩვენი ქვეყნის ენერგოსისტემაში მაღალი ძაბვის მოწყობილობების რემონტი ინტენსიურად მიმდინარეობს. მათში მყოფი ზეთები იმდენად დამველებულია, რომ უმეტესი მათგანის რეგენერაცია პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამის გამო რემონტის შემდეგ ახალი ზეთები გამოიყენება.

ამ ზეთების საექსპლუატაციო გამოცდილებამ აჩვენა, რომ მათი თვისებები ექსპლუატაციის დაწყებიდან რამოდენიმე წლის განმავლობაში საგრძნობ ცვლილებას განიცდის, რაც ჩვენს მიერ დასახულ მიზანს აქტუალურს ხდის და მიღებულ შედეგებს პრაქტიკული გამოყენება ექნება.

1.4. ტრანსფორმატორის ზეთის დამველებით

წარმოქმნილი მინარევები

ტრანსფორმატორის ზეთის დამველება მასზე ტემპერატურის, ელექტრული ველის და მეტალების კატალიზატორული ზემოქმედებით მიმდინარეობს. წყალი და ჟანგბადი დამველების პროცესს კიდევ უფრო აჩქარებს. თუ ელექტრომოწყობილობის ჰერმეტიზაცია დარღვეულია ან ზეთს სპეციალური დაცვა არ გააჩნია, მაშინ მასში ჰაერთან ერთად ჟანგბადი ადვილად აღწევს. რეაქციაში შედის ზეთის მოეკულებთან და დიჰოლურ მოლეკულებს წარმოქმნის. ეს მოვლენა ზეთის დაჟანგვის სახელით არის ცნობილი.

დაჟანგვის პროდუქტები ზეთის ყველა მახასიათებლის გაუარესებას და მყარი იზოლაციის დაშლას იწვევს. ამ მოვლენის შესამცირებლად ტრანსფორმატორის ზეთს ანტიდამჟანგავ მისართს იონოლს ან აგიდოლ-ს უმატებენ.

ზეთის დაძველების პროცესის მიმდინარეობაზე მნიშვნელოვან გავლენას თვით ზეთის შემადგენლობა ახდენს, რაც მეტია ზეთში ნაფტენური და არომატული ნახშირწყალბადები, მით ზეთი სტაბილურია დაჟანგვის მიმართ. მაგრამ მათი გაზრდა ზეთის სხვა საექსპლუატაციო მახასიათებლების გაუარესებას იწვევს.

დაძველების პროცესში მცირდება ზეთის გამრღვევი ძაბვა და კუთრი წინაღობა. იზრდება დიელექტრიკული დანაკარგები და დიელექტრიკული შეღწევადობა.

ფიზიკური მახასიათებლებიდან იზრდება სიმკვრივე, გარდატეხვის და ვერმანის კოეფიციენტები და ზეთის ფერი უფრო მუქი ხდება, ხოლო ზედაპირული დაჭიმულობა მცირდება.

ქიმიური მახასიათებლებიდან იზრდება ზეთის მჟავური რიცხვი, ტენშემცველობა და წყალში ხსნადი მჟავების და ტუტეების რაოდენობა.

დაძველებით წარმოქმნილი ზეთში უხსნადი მყარი ნაწილაკები მექანიკური მინარევები რაოდენობას ზრდიან. ზეთში მათი ხსნადობა რა თქმა უნდა ტემპერატურაზეა დამოკიდებული.

ზეთის დაძველება ხანგრძლივი პროცესია. როგორც დაკვირვებებმა აჩვენა, ეს პროცესი ტემპერატურის გაზრდით ინტენსიურად მიმდინარეობს. ძირითადად ზეთის დაჟანგვით გამოიხატება. დაჟანგვის პროცესს ხელს უწყობს სინათლის სხივი, ტემპერატურა, ზეთში გახსნილი ჟანგბადი, ხოლო კატალიზატორის როლს სპილენძი და სხვა მეტალები ასრულებს.

ჟანგბადის არყოფნის შემთხვევაში ზეთის დაჟანგვის პროცესი პრაქტიკულად არ მიმდინარეობს, მაგრამ ჟანგბადი მყარი იზოლაციის დაძველების შედეგად გამოიყოფა. ჟანგბადი თვით ზეთის მოლეკულების დაშლით ან მყარ იზოლაციაში ნაწილობრივი განმუხტვის შედეგად წარმოიქმნება. აგვარად ტრანსფორმატორის ზეთში ჟანგბადი ყოველთვის არსებობს. ზეთის დაჟანგვის პროცესში აგრეთვე ბმული და გახსნილი წყლის მოლეკულების ჟანგბადი მონაწილეობს. ამდაგვარად ზეთის

დაჟანგვის პროცესიც ზეთის ექსპლუატაციის მახასიათებელი მოვლენაა და რამოდენიმე ეტაპად მიმდინარეობს.

ექსპლუატაციისას ტრანსფორმატორის ზეთის დაჟანგვის საწყის პერიოდს საინკუბაციო პერიოდს უწოდებენ. ის ახალი ზეთში დაბალ ტემპერატურაზე (30-60°C) მიმდინარეობს. ამ დროს ზეთის მოლეკულებს ჟანგბადი უკავშირდება, მაგრამ დაძველების პროდუქტები არ გამოიყოფა. ჟანგბადის კავშირის ზეთის მოლეკულებთან ან რაიმე ცვლილების აღმოსაჩენად სხვადასხვა ფიზიკურ და ქიმიურ მეთოდების მიმართავენ. ტრანსფორმატორის ზეთის ანალიზისთვის გამოყენებული თანამედროვე ტექნიკური მეთოდებით ცვლილების გამოვლენა შეუძლებელია.

ინკუბაციის პერიოდი სხვადასხვა წარმოშობის ზეთებისთვის განსხვავებულია და მას ზეთის შემადგენლობა განაპირობებს. ტემპერატურის გაზრდით და სპილენძის კატალიზატორული მოქმედებით ინკუბაციის პერიოდის ხანგრძლივობა მცირდება.

შემდგომ ეტაპზე ზეთში დაჟანგვის მდგრადი პროდუქტების წარმოქმნა იწყება, როგორებიცაა დაბალმოლეკულური ორგანული მჟავები და ტუტეები, ორგანული ზეჟანგები, წყალი, შლამი, ნალექი და ზეთში უხსნადი სხვა პროდუქტები.

ამ პერიოდის დაჟანგვის ძირითად პერიოდს უწოდებენ. ამ ეტაპზე დაჟანგვის პროდუქტების მაქსიმალური რაოდენობა წარმოიქმნება, მაგრამ მათი მცირე ზომების გამო ისინი ზეთში შეტივტივებული არიან და შლამის სახით ნალექი ნაკლებად გამოიყოფა. ამ ეტაპზე ზეთის ყველა პარამეტრი მცირედ უარესდება, ზეთი უფრო მუქი ხდება და დაძველებისას წარმოქმნილი ორგანული მჟავების და ტუტეების კონცენტრაციის გაზრდით ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა მცირდება.

დაჟანგვის პროცესი ზრდადი ინტენსიურობით უწყვეტად მიმდინარეობს. თვლიან, რომ დაჟანგვა ძირითადად ეგრეთწოდებულ „სუსტ რგოლებზე“ ხდება და მათი რაოდენობის შემცირებით დაჟანგვის

ძირითადი ეტაპიც მთავრდება და დაჯანგვის ინტენსივობა შედარებით ნაკლებია.

დაჯანგვის საბოლოო პერიოდში დაჯანგვის ინტენსივობა უფრო ნაკლებია, ვიდრე ძირითად პერიოდში. ამასთანავე ძირითად პერიოდში წარმოქმნილი მცირე ზომის ნაწილაკების ერთმანეთთან კოვალენტურ კავშირს ამყარებს და ნალექი ინტენსიურად გამოიყოფა. ამ პერიოდში აგრეთვე ფენოლური ნაერთები წარმოიქმნება, რომლებიც ზეთის და მყარი იზოლაციის დაძველების პროდუქტებია.

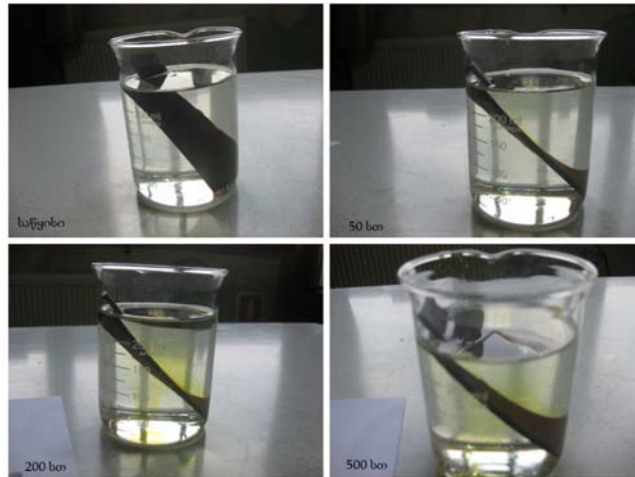
წარმოქმნილი ნალექი არა მარტო ზეთის მახასიათებლებს აუარესებს, არამედ აქტიური ნაწილის ზედაპირიდან სითბოგადაცემას ამცირებს, ხოლო ზოგჯერ ზეთსავალი არხების კეტვას. ამასთანავე წარმოქმნილი ორგანული მჟავები მყარი იზოლაციის დესტრუქციას და დაძველებას იწვევს [17].

ტრანსფორმატორის ახალი ან რეგენირებული ზეთის დაჯანგვისადმი მდგრადობის შესაფასებლად სხვადასხვა მეთოდები გამოიყენება. ექსპლუატაციაში წარმოქმნილი დაჯანგვის პროდუქტებით საექსპლუატაციო ზეთის მახასიათებლების ცვლილება ყოველმხრივ შესწავლილია, მაგრამ მყარი იზოლაციაში გახსნილი დაძველების პროდუქტების ან რემონტის შემდეგ ელექტრომოწყობილობაში დარჩენილი ზეთის დაძველების პროდუქტები ახალი ან რეგენირებული ზეთის მახასიათებლების ცვლილება და მასში დაძველების პროცესის მიმდინარეობს შესწავლას მოითხოვს.

ახალი ან რეგენირებული ზეთის გარემონტებულ ელექტრომოწყობილობაში ჩასხმისას, მყარი იზოლაციაში და აქტიური ნაწილის ზედაპირზე დარჩენილი ზეთის დაძველების პროდუქტები დიფუზიის და ზეთის მოძრაობით თანდათან იხსნება. ამ პროცესს ტემპერატურა უწყობს ხელს.

თუ ზეთი მხოლოდ სითბური კონვექციით მოძრაობს, მაშინ დაძველების პროდუქტების გახსნა შედარებით ნელა მიმდინარეობს და გახსნის პროცესს

მინარევების დიფუზია განაპირობებს. ხოლო ზეთის იძულებითი მოძრაობისას ეს პროცესი ძლიერდება.



ნახ. 1.5. ტრანსფორმატორის ახალ ზეთში მყარი იზოლაციიდან მინარევების გახსნა

ნახ. 1.5.-ზე ნაჩვენებია ტრანსფორმატორის ახალ ზეთში მინარევების გახსნის პროცესის მიმდინარეობა $80\pm 5^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე, როდესაც ზეთი არ მოძრაობს. ამისთვის დაძველებული ზეთიანი ტრანსფორმატორიდან ბარიერული იზოლაციის ნაჭერი ავიღეთ, ახალი ზეთით გავრცეხეთ და შემდეგ ახალ ზეთში მოვათავსეთ. პირველ ეტაპზე (50სთ) მინარევების გახსნა წელი ტემპით მიმდინარეობს. ზეთის ფერი არ იცვლება. რაც მყარი იზოლაციიდან მინარევების ზედაპირზე დიფუზიით გამოსვლის პროცესისთვის საჭირო დროით აიხსნება. მეორე ეტაპზე (500სთ) ზედაპირთან ახლოს მყოფი მინარევები კავშირს ამყარებენ ზეთის მოლეკულებთან და გახსნის სიჩქარე იზრდება. ზეთის ფერი იცვლება. გარკვეული დროის შემდეგ, როდესაც მყარ იზოლაციაში და ზეთში მყოფ მინარევებს შორის წონასწორობა მყარდება, მაშინ ზეთში და მყარ იზოლაციაში მყოფი მინარევების კონცენტრაციები (მათ შორის წყალი) უცვლელია, მაგრამ ზეთის ან მყარი იზოლაციის ტემპერატურის შეცვლით ეს წონასწორობა ირღვევა.

500 საათის განმავლობაში ზეთის ფერი უმნიშვნელოდ შეიცვალა, მაგრამ ეს მარტივი ცდა აჩვენებს, რომ მინარევების მყარი იზოლაციის

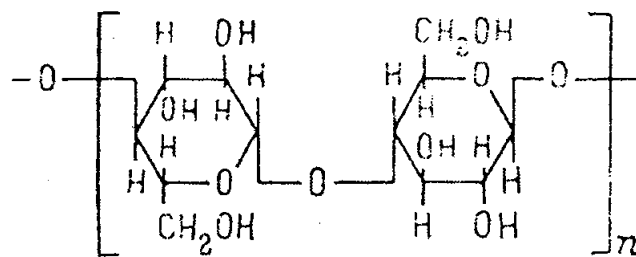
მოცულობიდან ზეთში გახსნა გარკვეულ დროს საჭიროებს, ხოლო აქტიური ნაწილის ზედაპირზე მყოფი მინარევები შედარებით ადრე იხსნებიან.

1.5. ელექტროტექნიკური ქაღალდის დაძველებით წარმოქმნილი მინარევები

მაღალი ძაბვის ზეთით შევსებული მოწყობილობების მყარ იზოლაციას ელექტროტექნიკური ქაღალდი და მუყაო წარმოადგენს, რომლებიც მერქნის გადამუშავების ბოჭკოვან მასალას ცელულოზას წარმოადგენს.

ცელულოზა ნახშირწყალბადებს მიეკუთვნება. მის ფორმულას ზოგადად შემდეგი სახე აქვს $(C_6H_{10}O_5)_n$. სადაც n ცელულოზის მოლეკულის პოლიმერიზაციის ხარისხია და გლუკოზური რგოლების რაოდენობას გვიჩვენებს ცელულოზის მოლეკულაში. მისი სიდიდე რამოდენიმე ასეულიდან რამდენიმე ათასამდე იცვლება.

გლუკოზური ჯგუფი არასიმეტრიული დიპოლური სტრუქტურისაა, ისინი ერთმანეთთან კავშირის დამყარებისას სივრცეში საწინააღმდეგო ორიენტაციას იკავებენ. ამის გამო, n -ის შემთხვევაში გლუკოზურ ორ რგოლს გულისხმობენ (ნახ. 1.6.).



ნახ. 1.6. ცელულოზის მოლეკულის სტრუქტურული ფორმულა

ცელულოზის მოლეკულას ჯაჭვისებრი აგებულება აქვს და მრავალი გლუკოზური რგოლებისგან შედგება. გლუკოზურ რგოლებს შორის ქიმიური კავშირი ჟანგბადის ატომის საშუალებით მყარდება. ეს კავშირი ცელულოზის ბოჭკოს სიმტკიცეს და ინერტულობას აძლევს. ცალკეული გლუკოზური რგოლები OH -ის სამ პოლარულ ჯგუფს შეიცავს. OH -ის

ჯგუფი დიპოლურია, ადვილად იზიდავს წყლის მოლეკულებს და ზეთის დაძველების პროდუქტებს და მათთან წყალბადურ კავშირს ამყარებს, ხოლო ცვლადი ძაბვის მოქმედებით დიპოლურ რელაქსაციური დიელექტრიკულ დანაკარგებს განაპირობებს.

ცელულოზის ცალკეული მოლეკულების გაერთიანებას მიცელებს უწოდებენ, მიცელების ერთმანეთში გაერთიანება, ელემენტარულ ბოჭკოს ანუ ფიბრილს წარმოშობს. მიცელის მოლეკულებს შორის სივრცე 10Å° -ის ტოლია, ხოლო ელემენტარულ ბოჭკოში მიცელებს შორის მანძილი 100Å° -მდეა. ამგვარად, ცელულოზის ნაწარმში თავისუფალი სივრცე მთელი მოცულობის 40% შეადგენს.

წყლის მოლეკულა, რომლის ზომები $2,7\text{Å}^{\circ}$ -ის რიგისაა, ან ზეთში ხსნადი დაძველების პროდუქტის მოლეკულები ადვილად აღწევს ამ თავისუფალ სივრცეში და OH -ის ჯგუფთან წყალბადურ კავშირს ამყარებს. თუ წყალმა ან დაძველების პროდუქტებმა მიცელებს შორის სივრცე დაიკავა, მაშინ მათ გაერთიანებას აქვს ადგილი და მისი ქაღალდიდან გამოდევნა უფრო ადვილია, ვიდრე მიცელის მოლეკულებს შორის მყოფის, რომელიც უშუალოდ გლუკოზური ჯგუფების OH -თან ამყარებს კავშირს. ამით აიხსნება ცელულოზის ნაწარმის მაღალი ჰიდროსკოპულობა და დაძველების პროდუქტების მყარ იზოლაციაში შეღწევა.

თავისუფალი სივრცის არსებობა ქაღალდის მცირე სითბოგამტარობის და დაბალი ელექტრული სიმტკიცის მიზეზია. ამ ნაკლოვანების აღმოფხვრის მიზნით ელექტროტექნიკურ ქაღალდს საიზოლაციო სითხით, კერძოდ ტრანსფორმატორის ზეთით ჟღენთავენ.

ელექტროსაიზოლაციო ქაღალდის მიღების მიზნით დაქუცმაცების შემდეგ აუცილებელია მერქანს სხვადასხვა სახის მინარევები მოვაცილოთ. ამისთვის მას მჟავას ან ტუტის წყალხსნარში ხარშავენ და მიღებულ მასას წყლით რეცხავენ. პირველ შემთხვევაში მიღებული ქაღალდი ნაკლები თერმომდგრადობით და შედარებით ნაკლები პოლიმერიზაციის ხარისხით ხასიათდება, ვიდრე ტუტით დამუშავებით მიღებული.

დღეისათვის ელექტროტექნიკური ქაღალდის მისაღებად სულფატური მეთოდი გამოიყენება, რაც ნატრიუმის ტუტის ($NaOH$) და ნატრიუმის სულფატის (Na_2S) წყალხსნარებში დაქუცმაცებული მერქნის ხარშვას მოიცავს. ასეთ ქაღალდს სულფატურ ქაღალდს უწოდებენ, მიღებულ მასას ცხელი წყლით რეცხავენ, ნაწილობრივ აშრობენ და სპეციალური მოწყობილობებით ელექტროტექნიკურ ქაღალდს ან მუყაოს ამზადებენ. ის ყვითელი ფერის და კარგი მექანიკური თვისებებისაა.

ელექტროტექნიკური ქაღალდის დანიშნულების მიხედვით საკაბელო, სატრანსფორმატორო, საკონდენსატორო, დასახვევი, გასაჟღენთი, სატელეფონო და სხვა სახის ქაღალდებად იყოფა.

მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორების დასამზადებლად $T-080$, $T-120$, $TM-120$, $TMP-120$, $TB-120$, და $TBY-080$ მარკის სატრანსფორმატორო ქაღალდი გამოიყენება. მარკაში T - სატრანსფორმატოროს, M - მრავალფენად დასახვევს, Π - გამტკიცებულს, B - მაღალძავიანს და Y - გამკვრივებულ ქაღალდს აღნიშნავს. რიცხვები კი მარკაში ქაღალდის სისქის მაჩვენებელია მიკრონებში [18].

ქაღალდის ელექტრული თვისებები დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, ტენზომეცველობაზე, ელექტრული ველის დამაბულობაზე, სისქეზე, დახვეული ფენების რაოდენობაზე და სხვა ფაქტორებზე (ცხრ. 1.2).

სატრანსფორმატორო ქაღალდი გრაგნილის მავთულების იზოლაციის, ტევადური რგოლების, მაღალი ძაბვის შემყვანების, საზომი ტრანსფორმატორების და სხვა დეტალების იზოლაციის შესაქმნელად გამოიყენება. ქაღალდის რამოდენიმე ფენად დახვევა დეფექტის დაუზიანებელი ფენით გადაფარვას და ელექტრული სიმტკიცის გაზრდას იწვევს.

$T-080$, $T-120$, $TM-120$ და $TMP-120$ მარკის სატრანსფორმატორო ქაღალდი ისეთ ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში გამოიყენება, რომელთა მუშა ძაბვა 150კვ-ს არ აღემატება. თუ მუშა ძაბვა 220კვ-ზე მეტია,

მაშინ ტრანსფორმატორებში $TM\Pi-120$, $TB-120$ და $TBY-080$ მარკის ქაღალდი გამოიყენება.

ცხრილი 1.2. ქაღალდის ელექტრული მახასიათებლები

| № | ქაღალდის მარკა | ϵ_r | $tg\delta$ % | ρ ომ.მ | $E_{გამ.}$ კვ/მმ | სისქე მკმ |
|----|--|--------------|-----------------|-------------------|---------------------|--------------|
| 1. | საკაბელო, K მარკის | 3,5-3,8 | 0,02 | $10^{10}-10^{13}$ | 6-8 | 15-240 |
| 2. | საკაბელო, $KB\Pi$ | 3,9-4,3 | 0,025 | $10^{12}-10^{13}$ | 7-8 | 15-240 |
| 3. | სატრანსფორმატორო, $TBY-080$ | 3,5-4 | 0,02 | $10^{12}-10^{13}$ | 9 | 80 ± 5 |
| 4. | გაუქლენთავი სატრანსფორმატორო, $T-120$, | 3,5-3,8 | 0,02 | $10^{12}-10^{13}$ | 7 | 12010 |
| 5. | გაუქლენთავი მუყაო (საჰაერო) | 3,3-3,6 | 0,03 | $10^{11}-10^{12}$ | 35 | 2000 |
| 6. | მუყაო (სითხის) | 3,5-3,8 | 0,02 | ---- | 25 | 2000 |
| 7. | გაუქლენთავი მუყაო (სითხის) გაჟალენთილი | 3,5-4,1 | ---- | $10^{12}-10^{13}$ | 45 | 2000 |

ელექტროტექნიკური მუყაო ანუ ელექტრომუყაო ქაღალდისაგან სისქით განსხვავდება, რომელიც 5მმ-მდეა. სისქის გაზრდა ბოჭკოებს შორის ფორების და დეფექტების გადაფარვას იწვევს. ამის გამო, მუყაოს ელექტრული სიმტკიცე ქაღალდის ელექტრულ სიმტკიცეს აღემატება (ცხრ. 1.2.).

სითხის გარემოში გამოსაყენებელ მუყაოს მეჩხერი სტრუქტურა აქვს, რის გამოც ზეთი ადვილად აღწევს მუყაოს მოცულობაში, ავსებს ფორებს და ზრდის მის ელექტრულ თვისებებს.

ტრანსფორმატორებში მუყაო განივი და ბარიერული იზოლაციის, საიზოლაციო საფენების, შემკვრელი არტახების და ძელების იზოლაციის და სხვა საიზოლაციო დეტალების დასამზადებლად გამოიყენება.

ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში შიგა საიზოლაციო სისტემას ცელულოზის ნაწარმი და ტრანსფორმატორის ზეთი წარმოადგენს. ექსპლუატაციის განმავლობაში მათზე ტემპერატურა, ელექტრული ველი, ტენი, მინარევები და სხვა ფაქტორები მოქმედებს. ამის გამო, ცელულოზის ნაწარმის ელექტრული და მექანიკური თვისებები შეუქცევად უარესდება, რასაც ელექტროქიმიურ დამველებას ან მარტივად ქაღალდის დამველებას უწოდებენ [19].

ქაღალდის და მუყაოს დაძველების პროცესის ინტენსივობას ტემპერატურა და ელექტრული ველის სიდიდე განაპირობებს. თუ მყარი იზოლაციის მუშა ტემპერატურა 90°C -ზე ნაკლებია, მაშინ დაძველების პროცესი სუსტად მიმდინარეობს და ის ცელულოზის ნაწარმის საექსპლუატაციო ანუ ნორმალურ დაძველებად ითვლება.

ექსპლუატაციაში მყარი იზოლაციის ლოკალური გადახურებაა შესაძლებელი. მაშინ დაძველების ინტენსივობა სწრაფად იზრდება. კერძოდ, თუ ტემპერატურა 110°C -ს აღემატება, დაძველების პროცესი ინტენსიურია და ტემპერატურის 8°C -ით გაზრდით ინტენსივობა ორჯერ იზრდება [20].

ელექტროსაიზოლაციო სისტემებში ელექტრული ველის დამაბულობა 5კვ/მმ -ს არ აღემატება. ამ შემთხვევაში ნაწილობრივი განმუხტვებით განპირობებული დაძველების პროცესი, ტემპერატურით გამოწვეულ დაძველებასთან შედარებით, უმნიშვნელოა. მყარი იზოლაციის ტენშემცველობის გაზრდით ნაწილობრივი განმუხტვებით გამოწვეული დაძველების ინტენსივობა იზრდება.

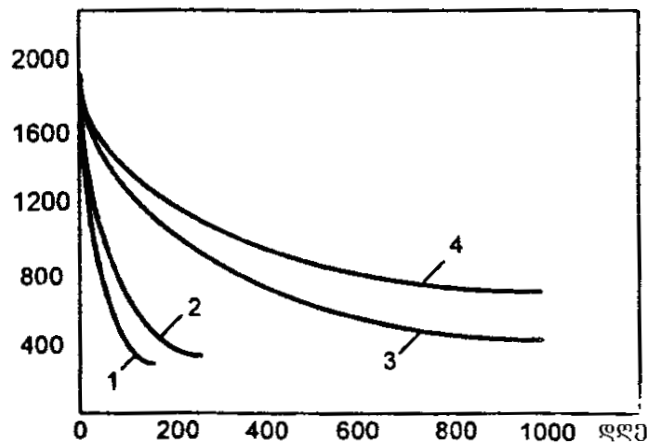
დაძველების შედეგად ქაღალდის ან მუყაოს ელექტრული თვისებების ცვლილება ძნელი დასადგენია, რადგან ზეთითაა გაჟღენთილი და ზეთის გავლენის გამორიცხვა პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამის გამო, ელექტრული მახასიათებლებით ქაღალდის ან მუყაოს დაძველების შეფასება შეუძლებელია. დაძველებით მექანიკური თვისებები უფრო უარესდება, ვიდრე ელექტრული, ამის გამო, ცელულოზის ნაწარმის დაძველების შეფასებას მექანიკური მახასიათებლების ცვლილებებით ახდენენ.

ცელულოზის ნაწარმის ელექტრული და მექანიკური თვისებები ძლიერაა დამოკიდებული ცელულოზის მოლეკულების პოლიმერიზაციის ხარისხზე. დაძველება n სიდიდის შემცირებაში გამოიხატება. კერძოდ, ცელულოზის მოლეკულაში გლუკოზურ რგოლებს შორის ჟანგბადის

ატომებით წარმოქმნილი კოვალენტური კავშირი წყდება, ე.ი. პოლიმერიზაციის ხარისხი მცირდება.

პოლიმერიზაციის ხარისხის შემცირების სამი მექანიზმი არსებობს:

1. ცელულოზის მოლეკულების თერმული დესტრუქცია (პიროლიზი), რომელიც ტემპერატურის მოქმედებით ჟანგბადისა და ტენის გარეშე მიმდინარეობს. ამ შემთხვევაში დაძველების ინტენსივობა მცირეა და ტემპერატურის 120°C-დან 180°C-მდე გაზრდით n სიდიდე 3-ჯერ მცირდება (ნახ. 1.7.).

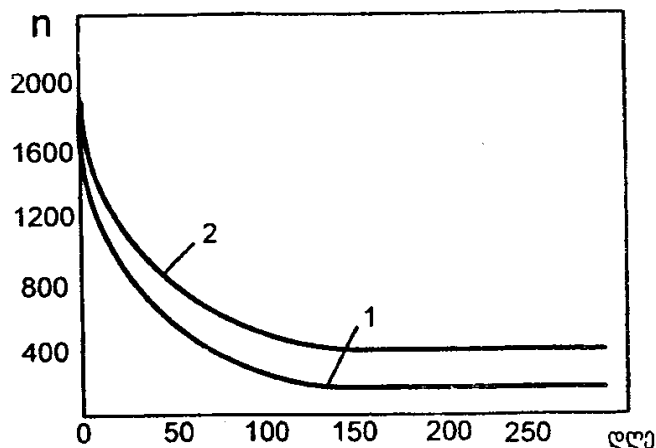


ნახ. 1.7. ტრანსფორმატორის ზეთში მყოფი *KMTY* – 080 მარკის საკაბელო ქაღალდის პოლიმერიზაციის ხარისხის (n) დამოკიდებულება დაძველების ხანგრძლივობასა და ტემპერატურაზე: 1-180°C, 2-160°C, 3-140°C და 4-120°C

2. თუ ცელულოზის ნაწარმზე ტემპერატურასთან ერთად წყლის მოლეკულები (ტენი) და ზეთის დაძველების შედეგად წარმოქმნილი ორგანული მჟავები მოქმედებს, მაშინ ადგილი აქვს ცელულოზის მოლეკულის ჰიდროლიზს, რაც გლუკოზურ რგოლებს შორის კავშირის გაწყვეტას და n -ის შემცირებას იწვევს.

3. როდესაც ტრანსფორმატორის ზეთში ატმოსფერული ჰაერი აღწევს, მაშინ ჟანგბადის მოქმედებით პირველ ეტაპზე ($t < 70^\circ\text{C}$) ადგილი აქვს გლუკოზური რგოლების ჰიდროქსილური ჯგუფების დაჟანგვას, მაგრამ რგოლებს შორის კავშირი არ წყდება. ტემპერატურის გაზრდით დაჟანგვის პროცესის გაძლიერება ხდება, რაც კავშირის გაწყვეტას და n -ის შემცირებას იწვევს. ჟანგბადის რაოდენობის გაზრდით აღნიშნული პროცესი

ძლიერდება და ჟანგბადის რაოდენობის 0,3%-დან 3%-მდე გაზრდით პოლიმერიზაციის ხარისხი 3-ჯერ მცირდება (ნახ. 1.8.).



ნახ. 1.8. ტრანსფორმატორის ზეთით გაჟღენთილი *TBY – 080* მარკის საკაბელო ქაღალდის პოლიმერიზაციის ხარისხის (n) დამოკიდებულება დროზე და ზეთში ჟანგბადის შემცველობაზე (მოცულობის %) 1-0,3% და 2-3%

რეალურ პირობებში ცელულოზის ნაწარმზე მრავალი ფაქტორი მოქმედებს, ამის გამო დაძველების სამივე მექანიზმი მეტ-ნაკლებად გამოვლინდება, რის გამოც n მცირდება.

დესტრუქციის შედეგად ქაღალდის ბოჭკოების ფრაგმენტები ზეთში გადადის და მყარი ნაწილაკების რაოდენობას ზრდის. ეს ფრაგმენტები დიპოლური სტრუქტურის არიან და ტენის შთანთქმის და ზეთის დაძველების პროდუქტების დიპოლური კავშირით მიზიდვის დიდი უნარით ხასიათდება. შედეგად ქაღალდის დაძველების პროდუქტები მცირე ზომის მინარევების თავმოყრის ცენტრებს წარმოადგენს. ეს კი ტრანსფორმატორის ზეთის და საბოლოოდ ელექტროსაიზოლაციო სისტემის მახასიათებლების გაუარესებას იწვევს.

დასკვნა პირველი თავის მიმართ

1. ექსპლუატაციისას ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლების გაუარესება ზეთის დაძველების სახელით არის ცნობილი. ის ზეთის მახასიათებელი მოვლენაა და სხვადასხვა მექანიზმით უწყვეტად

- მიმდინარეობს. დაძველების შედეგად წარმოქმნილ აირად, თხევად და მყარ ნაერთებს ზეთის დაძველების პროდუქტებს უწოდებენ. ისინი ტრანსფორმატორის ზეთში მინარევების სახით არიან;
2. ზეთის დაძველების ერთ-ერთ ძირითად მექანიზმს დაჟანგვა წარმოადგენს, რომელიც ჟანგბადის და ტემპერატურის მოქმედებით მიმდინარეობს. ამ პროცესში მეტალის კატალიზატორული როლი მნიშვნელოვანია. დაჟანგვის შედეგად ზეთში მეტალორგანული და ასფალტური ნაერთები, ორგანული მჟავები და ტუტეები, წყალი და სხვა პროდუქტები წარმოიქმნება;
 3. დაძველების პროდუქტების ნაწილი ზეთში ხსნადია. ნაწილი კი ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის და მყარი იზოლაციის ზედაპირთან კოვალენტურ კავშირს ამყარებენ და ნალექის სახით გამოიყოფიან, შემდეგ კი დიფუზიის გზით მყარი იზოლაციის მოცულობაში აღწევენ;
 4. მყარი იზოლაციის დაძველება შედარებით ხანგრძლივი პროცესია. ის ცელულოზის ბოჭკოების დესტრუქციაში გამოიხატება. ძირითადად აირადი (CO, CO_2) ან თხევადი (წყალი) დაძველების პროდუქტები წარმოიქმნება;
 5. როდესაც ტრანსფორმატორის ზეთი ძლიერ დაძველებულია და მისი მახასიათებლების სიდიდე საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნებს არ აკმაყოფილებს, ზეთს რეგენერაციას უტარებენ ან ახლით ცვლიან;
 6. ტრანსფორმატორის რემონტის მიმდინარეობისას დაძველების პროდუქტების მთლიანი მოცილება აქტიური ნაწილის ზედაპირიდან ან მყარი იზოლაციის მოცულობიდან შეუძლებელია. მათი ნაწილი ყოველთვის რჩება და ტრანსფორმატორში ახალი ან რეგენირებული ზეთის ჩასხმისას ისინი ზეთში იხსნებიან, რითაც ახალი ზეთის თვისებებს აუარესებენ;
 7. საექსპლუატაციო გამოცდილებამ აჩვენა, რომ ელექტრომოწყობილობაში, რომელშიც საექსპლუატაციოდ უვარგისი

დაძველებული ზეთი იყო, ახალი ზეთის თვისებები უფრო სწრაფად უარესდება, ვიდრე ახალ ელექტრომოწყობილობაში, რაც ზეთის დაძველების ნარჩენი პროდუქტებით არის გამოწვეული.

თავი 2. ტრანსფორმატორის ზეთის პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდები

2.1 ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის განსაზღვრა

ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდე ($U_{\text{გამრ.}}$) ზეთის ელექტროსაიზოლაციო თვისების მახასიათებელია და სხვადასხვა სახის მინარევებითაა განპირობებული.

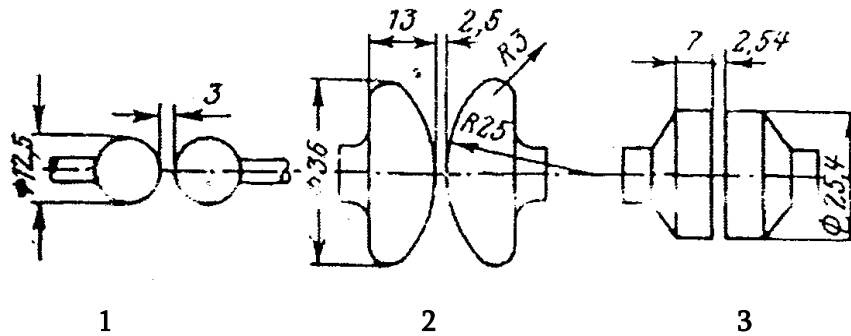
როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ტრანსფორმატორის ზეთში მინარევებს ტენი, მყარი ნაწილაკები და ზეთში გახსნილი აირები წარმოადგენს. მინარევების რაოდენობის შემცირებით ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრული სიმტკიცე იზრდება.

ნებისმიერი დიელექტრიკის ელექტრული სიმტკიცე დამოკიდებულია ელექტროდებს შორის მანძილზე, ველის ერთგვაროვნებაზე, ძაბვის ზრდის სიჩქარეზე, ელექტროდის მასალის და ზედაპირის მდგომარეობაზე. ამის გამო, მათ ისე ირჩევენ, რომ ცდის ჩატარების პირობები მაქსიმალურად მიუახლოვდეს ზეთის ექსპლუატაციის პირობებს და ითვალისწინებდეს მინარევების გავლენას.

ამ მოსაზრებიდან გამომდინარე, სხვადასხვა ქვეყანაში ტრანსფორმატორის ელექტრული სიმტკიცის განსაზღვრის განსხვავებული მეთოდებია სტანდარტიზებული, მაგრამ აკმაყოფილებს საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისიის (*IEC*, სეკ) მოთხოვნებს [21].

ელექტროდებს შორის მანძილს იმგვარად ირჩევენ, რომ საიზოლაციო სისტემაში ზეთის არხის მინიმალური ზომების ტოლი იყოს. სხვადასხვა ქვეყანაში ეს ზომები განსხვავებულია. ამის გამო, ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრული სიმტკიცის განსაზღვრავი უჯრედის ელექტროდებს შორის მანძილიც განსხვავდება (ცხრ. 2.1). ამასთანავე, განსხვავდება ელექტროდის ფორმა და დიამეტრი (ნახ. 2.1). ელექტროდის ფორმა შეიძლება იყოს

სფერული (1), სოკოსებრი – როგოვსკის ელექტროდები (2) ან დისკოსებრი (3). უმეტეს შემთხვევაში ელექტროდები სოკოსებრი ფორმისაა [11].



ნახ. 2.1 ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრული სიმტკიცის განსასაზღვრავი უჯრედის ელექტროდის ფორმები: სფერული (1), სოკოსებრი (2), და დისკოსებრი (3).

უმეტეს შემთხვევაში ელექტროდებს შორის მანძილი 2,5 მმ ტოლია. არის შემთხვევები, როდესაც ეს მანძილი განსხვავებულია (ცხრ. 2.1)

ცხრილი 2.1. ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის განსასაზღვრავი უჯრედის მახასიათებლები

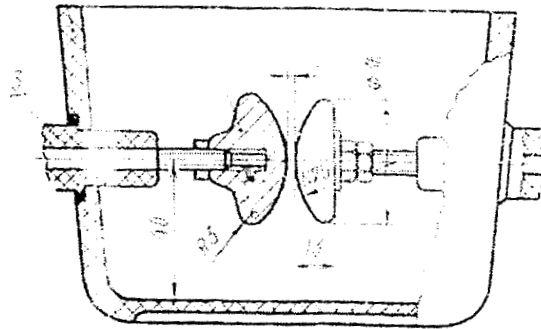
| ქვეყნები | სტანდარტი | ელექტროდის ფორმა | მანძილი, მმ | ძაბვის ზრდის სიჩქარე, კვ/წმ |
|------------|--------------|------------------|-------------|-----------------------------|
| რუსეთი | ГОСТ 6581-75 | სოკოსებრი | 2,5 | 2 |
| აშშ | ASTM:D877 | სოკოსებრი | 2,54 | 2 |
| საფრანგეთი | – | სფერული | 5,0 | 1–2 |
| ინგლისი | BS:148 | სფერული | 4,0 | საფეხურებად |
| იაპონია | JISC:2320 | – | 2,8 | 3 |
| IEC | D 1816 | სფერული | 2,5 | 2 |
| | | სოკოსებრი | 2,5 | 2 |

თხევადი დიელექტრიკების ელექტრული სიმტკიცის განსასაზღვრავ უჯრედში ელექტროდებს შორის სტანდარტული (2,5 მმ) მანძილის გამრღვევი ძაბვის ($U_{\text{გამრ.}}$) სიდიდის მიხედვით წარმოებს და კილოვოლტებში გამოსახვენ.

ელექტროდებზე მოქმედი ძაბვის ზრდის სიჩქარე ისეა შერჩეული, რომ გარღვევის ფორმირებამდე ზეთში სითბურმა გარღვევამ განვითარება არ დაიწყო. ეს სიჩქარე, უმეტეს შემთხვევაში, 2-კვ-ია წამში.

როგორც 2.1 ცხრილიდან ჩანს, სხვადასხვა მეთოდში გამოყენებული უჯრედების მახასიათებლები განსხვავდება და, შესაბამისად, ამ მეთოდებით მიღებული $U_{\text{გამრ.}}$ განსაზღვრის შედეგების ერთმანეთთან შედარება დაუშვებელია.

ზეთის გამრღვევი ძაბვის განსასაზღვრავი უჯრედი საიზოლაციო მასალისგან დამზადებული ჭურჭელია (1), რომელშიც ბრინჯაოს საკოსებრი ელექტროდები $2,5 \pm 0,01\text{მმ}$ მანძილითაა ერთმანეთისაგან დაშორებული (2) და სპეციალური გამომყვანებით (3) მაღალი ძაბვის წყაროს უკავშირდება (ნახ. 2.2) ელექტროდებს შორის მანძლის სიდიდე და ელექტროდის ზედაპირის სისუფთავე პერიოდულ კონტროლს მოითხოვს.



ნახ. 2.2 ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის განსასაზღვრავი უჯრედი

უჯრედზე მაღალი ძაბვის მიწოდება ნახ. 2.3-ზე გამოსახული სქემით ავტოტრანსფორმატორის მცოცის გადაადგილებით წარმოებს. ამძრავი უჯრედზე ძაბვის სიდიდეს მუდმივი სიჩქარით ზრდის, ხოლო $U_{\text{გამრ.}}$ -ის ფიქსირება სპეციალური მოწყობილობის და პირველად წრედში ჩართული კილოვოლტმეტრის (მილიამპერმეტრის) საშუალებით ხდება.

უჯრედის ზეთით შევსებიდან 10 წუთის შემდეგ ძაბვა თანაბარი სიჩქარით იზრდება და გარღვევის მომენტში $U_{\text{გამრ.}}$ -ის სიდიდე ფიქსირდება. შემდგომ გარღვევას 5 წუთის ინტერვალით იმეორებენ. ელექტროდებს შორის სივრციდან გარღვევის პროდუქტების გამოდევნის მიზნით ყოველი გარღვევის შემდეგ ელექტროდებს შორის ზეთს მინის წკირით ფრთხილად ურევენ [11].

ზეთით შევსებულ უჯრედში თანმიმდევრობით 6 ცდას ატარებენ და შესაბამის $U_{\text{გამრ.}}$ სიდიდეს აფიქსირებენ. ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდედ მიღებულია $U_{\text{გამრ.}}$ ექვსი სიდიდის საშუალო არითმეტიკული მნიშვნელობა:

$$U_{\text{გამრ.}} = \frac{U_{\text{გამრ.1}} + U_{\text{გამრ.2}} + U_{\text{გამრ.3}} + U_{\text{გამრ.4}} + U_{\text{გამრ.5}} + U_{\text{გამრ.6}}}{6} \quad (2.1)$$

მიღებული $\bar{U}_{\text{გამრ.}}$ სიდიდე ტრანსფორმატორის ზეთს რაოდენობრივად აფასებს, მაგრამ თვისობრივად არ ახასიათებს. ამ მიზნით შედეგებს სტატისტიკურ ანალიზს უტარებენ. კერძოდ, გამრღვევი ძაბვის განსაზღვრის საშუალო კვადრატულ გადახრას და ვარიაციის კოეფიციენტს გამოთვლიან.

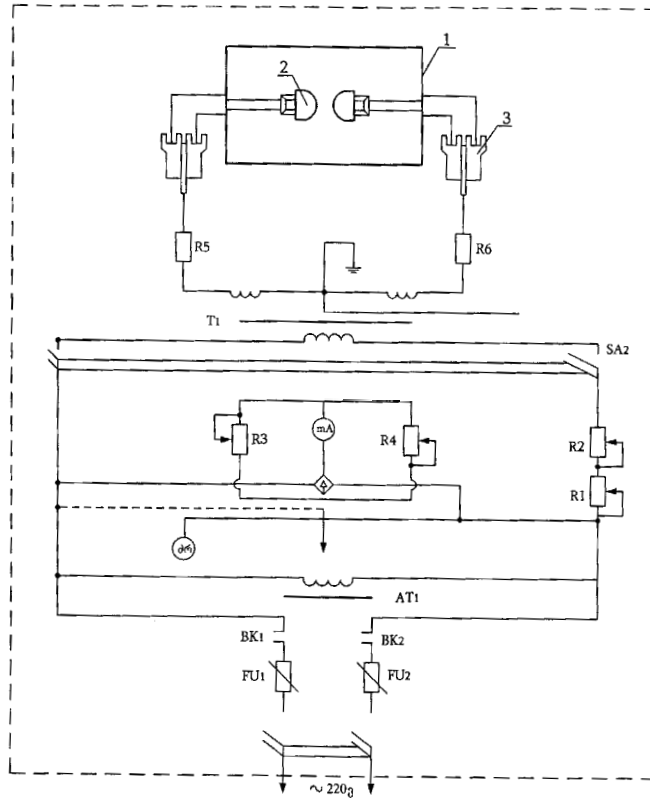
საშუალო კვადრატული გადახრა (σ_u), რომელიც ჭეშმარიტ სიდიდესთან მიღებული შედეგის მიახლოებას ახასიათებს შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\bar{U}_{\text{გამრ.}i} - \bar{U}_{\text{გამრ.}})^2}{n(n-1)}} \quad (2.2)$$

ვარიაციის კოეფიციენტი (V) ზეთის ერთგვაროვნების მახასიათებელია და $\bar{U}_{\text{გამრ.}}$ -ის სიდიდეზე მინარევების გავლენას ასახავს. ის შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$V = \frac{\sigma_u \cdot 100\%}{U_{\text{გამრ.}}} \quad (2.3)$$

თუ ვარიაციის კოეფიციენტი 10%-ზე ნაკლებია, მაშინ $\bar{U}_{\text{გამრ.}}$ სიდიდეზე მინარევების გავლენა უმნიშვნელოა, თუ V -ის მნიშვნელობა 20% აღემატება, მაშინ ზეთი არაერთგვაროვანია. ამის დასამტკიცებლად ცდას მეორეჯერ ახალი სინჯით ატარებენ. მიღებულ შედეგებს პირველი ცდის შედეგებთან აერთიანებენ და თორმეტი ცდის ($n=12$) შედეგის მიხედვით $\bar{U}_{\text{გამრ.}}$, σ_u და V -ს განსაზღვრას ახდენენ. ამ შემთხვევაში მიღებული შედეგი საბოლოოდ ითვლება [11].



ნახ. 2.3 АИМ-90 ტიპის დანადგარის ელექტრული გამართივებული სქემა

1. – გამზომი უჯრედი;
2. – ნახევრად სფერული ბრინჯაოს ელექტროდები;
3. – იზოლატორები.

თუ ტრანსფორმატორის ზეთის $U_{\text{გამრ.}}$ -ის განსაზღვრის ვარიაციის კოეფიციენტი 20% აღემატება, მაშინ, როგორც არ უნდა იყოს $\bar{U}_{\text{გამრ.}}$ სიდიდე, ზეთის ექსპლუატაცია რეკომენდებული არ არის [11].

2.2 ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის განსაზღვრა

ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი მოცულობითი წინაღობის (ρ_v) სიდიდე ანუ ზეთის კუთრი წინაღობა 10^8 ომმ–დან 10^{13} ომმ–მდე იცვლება და მას მინარევებით გამოწვეული გამტარობა განაპირობებს. უაღრესად სუფთა ზეთის კუთრი წინაღობა 10^{14} ომმ–მდეა.

ზეთის კუთრი წინაღობა ტემპერატურის 20°C –დან 90°C –მდე გაზრდით ექსპონენციალურად 10–12–ჯერ მცირდება, რაც ახალი ზეთის

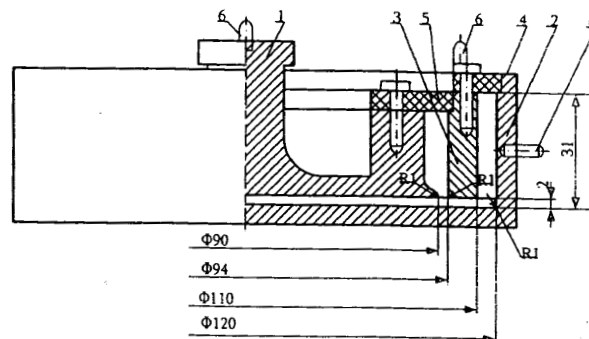
მახასიათებელი თვისება. მინარევებიან ან დაძველებული ზეთისთვის შემცირება უფრო მეტია.

ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინალობის სიდიდე სტანდარტით ნორმირებული არ არის, მაგრამ ზეთის მდგომარეობის დამატებითი მახასიათებელია და იმ შემთხვევაში გამოითვლება, თუ ზეთის სრული გამოკვლევა ან სისუფთავის ხარისხის შემოწმებას აქვს ადგილი. საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისიის რეკომენდაციით კი სტანდარტიზირებულია და სავალდებულოა [70].

როდესაც ტრანსფორმატორის ზეთი დაძველების პროდუქტებს და მინარევების მყარ ნაწილაკებს არ შეიცავს, მაგრამ ტენიანია, მაშინ ტემპერატურის $20^{\circ}C$ –დან $90^{\circ}C$ –მდე გაზრდისას, ტენის აორთქლების შედეგად, ზეთის წინალობა იზრდება.

კუთრი წინალობის სიდიდის განსაზღვრისთვის სპეციალურ უჯრედში მოთავსებული ზეთის წინალობას მუდმივი დენის მიმართ საზღვრავენ და შემდეგ უჯრედის მუდმივას გათვალისწინებით, ρ სიდიდეს გამოითვლიან.

თხევადი დიელექტრიკების წინალობის განსაზღვრავი უჯრედი ბრტყელი ან ცილინდრული ფორმისაა. უმეტეს შემთხვევაში ბრტყელი, მრგვალი ფორმის უჯრედი გამოიყენება [11], რომელიც ერთმანეთისაგან საიზოლაციო მასალით (3,4) ელექტრულად გამხოლოებული სამი ელექტროდისაგან (1,2,5) შედგება (ნახ. 2.4)



ნახ. 2.4 თხევადი დიელექტრიკების ρ , $tg\delta$ და ϵ , განსაზღვრავი უჯრედი (ზომები მილიმეტრებში)

მაღალძაბვიან ელექტროდს (5) ბრტყელი, ერთგვაროვანი ძირი აქვს, რომლის გვერდებს საიზოლაციო მასალისგან დამზადებული რგოლი (4) ეყრდნობა. ამ რგოლზე ეკრანი (დამცავი) – რგოლისებრი ელექტროდი (2) თავსდება დამცავ ელექტროდში საიზოლაციო მასალისგან დამზადებული მეორე რგოლი (3) იდგმება, რომელიც გამზომ ელექტროდს (1) აფიქსირებს. სამივე ელექტროდს გამზომ ხელსაწყოსთან ელექტრული კავშირის დასამყარებლად სპეციალური გამომყვანები (6) აქვს. მაღალძაბვიანი ელექტროდი გამზომი ხელსაწყოს „+“ მომჭერს, ხოლო გამზომი ელექტროდი და დამცავი რგოლი შესაბამისად, „-“ მომჭერს და ხელსაწყოს ეკრანს უკავშირდება.

სხვადასხვა ტემპერატურაზე გაზომვებისთვის უჯრედი იზოლირებული სადგართ თერმოსტატში თავსდება. თერმოსტატის კორპუსი და გამზომ ხელსაწყოსთან უჯრედი დამაკავშირებელი სადენების ეკრანები დამიწებულია.

უჯრედის საიზოლაციო რგოლები მაღალი წინაღობის მასალებისგან (კვარცი, კერამიკა ან ფთოროპლას-4) მზადდება. მათ ზედაპირზე მინარევები არ უნდა გროვდებოდეს, ხოლო მუშა ტემპერატურის ინტერვალში გეომეტრიულ ზომებს არ უნდა იცვლიდეს. წინააღმდეგ შემთხვევაში გამზომ და მაღალი ძაბვის ელექტროდს შორის სტანდარტით განსაზღვრული მანძილი $2 \pm 0,1\text{მმ}$ შეიცვლება, რაც უჯრედის მუდმივას ცვლილებას და, შესაბამისად, ρ ცდომილებას გამოიწვევს.

უჯრედის დეტალები და საიზოლაციო რგოლები წინასწარ სტანდარტის [11] მოთხოვნის მიხედვით სუფთავდება და მოწმდება. გასუფთავებულ, აწყობილ უჯრედს გამზომ ხელსაწყოსთან აერთებენ და გაზომვის ძაბვაზე წინაღობის სიდიდეს ზომავენ, რომელიც მოსალოდნელ სიდიდეზე 50–100–ჯერ მეტი უნდა იყოს.

გაზომვის წინ უჯრედს გამოსაკვლევ ზეთს ავლებენ და შემდეგ უჯრედს არანაკლებ 50 მილილიტრი ზეთით, აირის ბუშტების წარმოქმნის გარეშე ავსებენ.

ტრანსფორმატორის ზეთის მოცულობითი წინაღობის R_v გაზომვისას, გამზომ და მაღალძაბვიან ელექტროდს შორის ველის დამაბულობა 250 ვოლტი/მმ ტოლია, ე.ი. უჯრედზე 500 ვოლტი მუდმივი ძაბვა მოქმედებს. R_v სიდიდე ძაბვის მოქმედებიდან 60 წამის შემდეგ აითვლება. გაზომვას ორ უჯრედში ან ერთი და იმავე უჯრედში გასუფთავების შემდეგ ორჯერ ატარებენ. თუ გაზომვის ორ შედეგს შორის უდიდესი უმცირესზე 35%-ზე ნაკლებად განსხვავდება, მაშინ მიღებული შედეგები სარწმუნოდ ითვლება და R_v მნიშვნელობად უდიდეს შედეგს იღებენ [11].

ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი მოცულობითი წინაღობა ρ_v შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$\rho_v = 0,113C_o \cdot R_v, \text{ომი.მ}, \quad (2.4)$$

სადაც $0,113C_o$ უჯრედის მუდმივია, ხოლო C_o ცარიელი უჯრედის ტევადობა გაზომვის ტემპერატურაზე პიკოფარადებში.

R_v სიდიდის გაზომვა ტერაომეტრის, სპეციალური მეგაომეტრის, ელექტრომეტრის ან მუდმივი დენის მაღალომიანი ბოგირების საშუალებით წარმოებს.

2.3 ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების განსაზღვრა

ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების ($tg\delta$) სიდიდე ზეთის საექსპლუატაციო მდგომარეობის ძირითადი მახასიათებელია.

ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთის $tg\delta$ სიდიდის გაზრდა ზეთის დაძველების, მასში სხვადასხვა სახის მინარევების ან მყარი იზოლაციის დაძველების პროდუქტების არსებობის მაჩვენებელია.

ტრანსფორმატორის ზეთის $tg\delta$ განსაზღვრას სტანდარტის მოთხოვნის მიხედვით დამზადებულ იმავე უჯრედსა (ნახ. 2.4) და თერმოსტატში წარმოებს, რომლითაც ზეთის წინაღობა განისაზღვრება [11].

უჯრედის მომზადება და ზეთით შევსება ანალოგიურია. დაშვებულია $tg\delta$ და R_v სიდიდეების პარალელურად განსაზღვრა.

$tg\delta$ სიდიდის გაზომვა ცვლადი ძაბვის ბოგირით (P5026), გაზომვის პირდაპირი სქემით (ნახ. 2.5) ტემპერატურის დამყარებიდან 10 წუთის შემდეგ წარმოებს.

ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების ($tg\delta$) განსაზღვრა 50 ჰერცი ძაბვის მოქმედებით ხდება. უჯრედში ელექტრული ველის დაძაბულობა 1კვ/მმ ტოლი უნდა იყოს, რადგან უჯრედის გამზომ და მაღალძაბვიან ელექტროდს შორის მანძილი $2 \pm 0,1$ მმ ტოლია, ამის გამო, $tg\delta$ -ს გაზომვის სქემზე მიწოდებული ძაბვის მომქმედი მნიშვნელობა 2 კილოვოლტის ($\pm 3\%$) ტოლია [11].

ტრანსფორმატორის ზეთის $tg\delta$ და C სიდიდის განსაზღვრა ცვლადი ძაბვის ბოგირის – შერინგის ბოგირის საშუალებით წარმოებს [23] და უდანაკარგო ტევადობაზე C_o , გამოსაკვლევი საიზოლაციო სისტემის ($tg\delta$ და C) შედარების მეთოდს ემყარება.

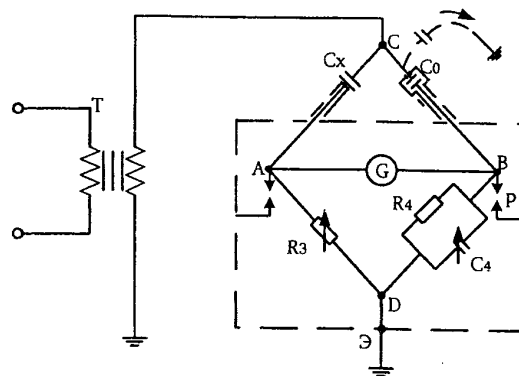
შერინგის ბოგირის ოთხი მხარიდან (ნახ. 4.5) ორი ტევადურ მხარს წარმოადგენს და გამოსაკვლევი C_x (ჩვენს შემთხვევაში გამზომი უჯრედი) და სანიმუშო C_o ტევადობებისგან შედგება. ეს ტევადობები ერთმანეთს ელექტრულად C წერტილში უკავშირდება, რომელზეც პირდაპირი სქემით გაზომვის შემთხვევაში მაღალი ძაბვა მოქმედებს.

ბოგირის ორი დანაჩენი მხარი რეზისტორულ-ტევადურ მხარს წარმოადგენს. ერთი პარალელურად ჩართული მრავალსაფეხურიანი R_4 წინაღობის და ცვლადი ტევადობის მქონე C_4 კონდენსატორისგან შედგება მეორე მხარეს მრავალსაფეხურიანი ცვლადი წინაღობის მქონე რეზისტორი

R_3 წარმოადგენს. ეს ორი მხარი ერთმანეთს ელექტრულად ბოგირის D წერტილში უკავშირდება.

გაზომვის სქემის D წერტილს ხელსაწყოს ეკრანის პოტენციალი აქვს და დამიწების სისტემასთანაა დაკავშირებული.

შერინგის ბოგირის ტევადური და რეზისტორულ-ტევადური მხარების ელექტრულად დაკავშირება წონასწორობის A და B წერტილებში ხდება. ბოგირის წონასწორობის ინდიკაცია ამ წერტილებს შორის ჩართული ნულ-ინდიკატორის (G) საშუალებით წარმოებს.



ნახ. 2.5 ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების და შეღწევადობის შერინგის ბოგირით გაზომვის გამარტივებული სქემა.

სქემის ელემენტების დაზიანების შემთხვევაში A და B წერტილი მაღალი პოტენციალის ქვეშ აღმოჩნდება. ხელსაწყოს დაცვის მიზნით, ამ წერტილებსა და ეკრანს შორის განმუხტველებია ჩართული.

ბოგირის წონასწორობის შემთხვევაში, ე.ი. როდესაც A და B წერტილებს შორის პოტენციალთა სხვაობა ნულის ტოლია, შემდეგი პირობა სრულდება:

$$R_x \cdot C_x = R_4 \cdot C_4 \quad (2.5)$$

ზემოთგანხილულის თანახმად გამოსაკვლევი სისტემის დიელექტრიკული დანაკარგები $tg\delta$ შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$tg\delta = \frac{R_x}{X_{C_x}} = \omega \cdot R_x \cdot C_x, \quad (2.6)$$

ე.ი

$$tg\delta = \omega \cdot R_4 \cdot C_4 \quad (2.7)$$

თუ R_4 სიდიდე მუდმივია, მაშინ გამოსაკვლევი საიზოლაციო სისტემის $tg\delta$ სიდიდე C_4 სიდიდის დადგენით განისაზღვრება.

ტრანსფორმატორის ზეთის $tg\delta$ უგანზომილებო სიდიდეა, მაგრამ პრაქტიკული გამოყენების მიზნით მას პროცენტებში გამოსახვენ, ე.ი.

$$tg\delta\% = tg\delta \cdot 100\% \quad (2.8)$$

ბოგირის წონასწორობის შემთხვევაში გამოსაკვლევი საიზოლაციო სისტემის ტევადობა C_x , ბოგირის R_4 და R_3 წინაღობების სიდიდეს და C_o ეტალონურ ტევადობას შემდეგი ფორმულითა უკავშირდება:

$$\frac{C_x}{C_o} = \frac{R_4}{R_3}, \text{ ე.ი. } C_x = \frac{R_4}{R_3} C_o \quad (2.9)$$

მიღებული შედეგების სიზუსტეს R_3 , R_4 და C_o ბოგირის ძირითადი ელემენტების სიზუსტე და, ტემპერატურის სტაბილურობა განაპირობებს.

გარე ელექტრომაგნიტური ველებისგან დაცვის მიზნით ბოგირის ყველა ელემენტი და შემაერთებული კაბელები ელექტრული ეკრანით არის დაცული. ამასთან, გასაზომ ობიექტთან დამაკავშირებელ კაბელებს ეკრანის მიმართ დიდი წინაღობა და თითქმის ნულოვანი მნიშვნელობის $tg\delta$ და C გააჩნდა.

გაზომვის სქემაში მაღალძაბვიან ელექტროდს „C“ წერტილის საშუალებით მაღალი ძაბვა მიეწოდება, ხოლო გამზომი ელექტროდი და ეკრანი, შესაბამისად, ცვლადი ძაბვის ბოგირის „ C_x “ და „ Δ “ მომჭერებს უერთდება.

$tg\delta$ სიდიდის ხელსაწყოზე ათვლა უჯრედებზე მაღალი ძაბვის მომქედებიდან სამი წუთის შემდეგ 0,01% სიზუსტით წარმოებს [11].

სათანადოდ მომზადებული ზეთით შეუვსებელი უჯრედი გაზომვის სქემას უკავშირდება და შესაბამისი ძაბვის მოქმედებით, ოთახის და გაზომვის ტემპერატურაზე $tg\delta_o$ და C_o სიდიდეები იზომება. თუ ცარიელი უჯრედის $tg\delta_o$ სიდიდე ტემპერატურის 15 – 35° C –ის ინტერვალში 0,01%-ს აღემატება, მაშინ უჯრედი სუფთა არ არის და $tg\delta$ –ს გაზომვა დაუშვებელია.

tgδ სიდიდეს ერთი და იგივე ტემპერატურაზე, ორი სხვადასხვა პორციის ზეთზე სათანადოდ მომზადებულ ორ უჯრედში ან ერთი და იგივე უჯრედში სათანადოდ გასუფთავების და შემოწმების შემდეგ ორჯერ ზომავენ. ორივე შემთხვევაში უმცირესი უდიდესისგან – 15%–ზე მეტად არ უნდა განსხვავდებოდეს. წინააღმდეგ შემთხვევაში, გაზომვის ამ მოთხოვნის დაკმაყოფილებამდე აგრძელებენ.

tgδ გაზომვის შედეგად ამ ორი მნიშვნელობიდან უმცირესი სიდიდე ითვლება.

თუ *tgδ* სიდიდის განსაზღვრა სხვადასხვა ტემპერატურაზე წარმოებს, ან საჭიროა *tgδ*–ს ტემპერატურაზე დამოკიდებულების განსაზღვრა, მაშინ გაზომვას უმცირესი ტემპერატურიდან იწყებენ.

2.4 ტრანსფორმატორის ზეთის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის განსაზღვრა

ტრანსფორმატორის ზეთი თხევად ნეიტრალურ დიელექტრიკს მიეკუთვნება. ახალი ზეთის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა (ϵ_r) $20^{\circ}C$ ტემპერატურაზე 2,15–დან 2,3–მდე იცვლება, დამოკიდებულია ზეთის სტრუქტურულ შემადგენლობაზე და სხვადასხვა მარკის ზეთებისათვის განსხვავებულია [22].

ტემპერატურის გაზრდით ϵ_r სწორხაზოვნად მცირდება და ϵ_r ტემპერატურული კოეფიციენტის სიდიდე $\alpha_{\epsilon} = -0,0006 - 0,00067 \frac{1}{\text{გრად}}$, ე.ი. ტემპერატურის $20^{\circ}C$ –დან $90^{\circ}C$ –მდე გაზრდით ტრანსფორმატორის ახალი ზეთის ϵ_r სიდიდე $\approx 0,1$ –ით მცირდება.

დაძველების პროდუქტები და მინარევები ტრანსფორმატორის ზეთის ϵ_r სიდიდეს ზრდის. შესაბამისად, ϵ_r –ის ცვლილების საშუალებით შესაძლებელია ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთის მდგომარეობის შეფასება.

ამ სახის შეფასების საშუალებას ვერმანის კოეფიციენტი (D_v) შემდეგი ფორმულის საშუალებით იძლევა:

$$D_v = \varepsilon_r - (n)^2 \quad (2.10)$$

ვერმანის კოეფიციენტის სიდიდე ტემპერატურაზე დამოკიდებული არ არის, მაგრამ D_v განსაზღვრას და, შესაბამისად, ε_r და n -ის გაზომვას $20 - 25^\circ C$ -ის ინტერვალში ახდენენ. ზუსტი გაზომვებით ვერმანის კოეფიციენტი ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების დაწყებას ადრეულ ეტაპზე გამოავლენს და მრავალ ქვეყანაში მისი განსაზღვრა სავალდებულოა.

ტრანსფორმატორის ზეთის ε_r სიდიდის განსაზღვრა საექსპლუატაციო ნორმით სავალდებულო არ არის, მაგრამ ზეთის სრული ანალიზის ან ზეთის დაძველების დაწყების შესაფასებლად მისი განსაზღვრა აუცილებელია.

ε_r სიდიდეს ზეთით შეუვსებელი უჯრედის ტევადობის C_o და ტრანსფორმატორის ზეთით შევსებული უჯრედის ტევადობათა (C) ფარდობით გამოითვლება:

$$\varepsilon_r = \frac{C - C_{პარ}}{C_o - C_{პარ}} \quad (2.11)$$

C და C_o სიდიდეების დადგენა ცვლადი ძაბვის ბოგირის საშუალებით, tgd -ს გაზომვასთან ერთად, იმავე პირობებში წარმოებს.

ტევადობის (C_o და C) განსაზღვრა ორი ცდის საშუალებით წარმოებს, რომლის დროსაც უმცირესი, უდიდესი შედეგიდან – 5%-ზე მეტად არ უნდა განსხვავდებოდეს. წინააღმდეგ შემთხვევაში ცდას პირობის დაკმაყოფილებამდე ერთი დაიმავე სინჯის სხვადასხვა პორციის ზეთზე ატარებენ.

ტრანსფორმატორის ზეთის სხვა მახასიათებლებისგან განსხვავებით ε_r -ის განსაზღვრა გაზომვის მეტ სიზუსტეს და უჯრედის მაღალ სისუფთავეს მოითხოვს.

პარაზიტული ტევადობა ($C_{\text{პარ}}$) სქემის შეამერთებელი კაბელების და უჯრედის საიზოლაციო როლების ტევადობითაა განპირობებული. $C_{\text{პარ}}$ სიდიდის დადგენა მაკალიბრებელი სითხით შევსებული უჯრედის ტევადობის (C') გაზომვით წარმოებს, რომლისთვისაც გაზომვის ტემპერატურაზე ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის სიდიდე (ϵ_r') დიდი სიზუსტით არის ცნობილი

$C_{\text{პარ}}$ შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$C_{\text{პარ}} = \frac{C_o \epsilon_r' - C'}{\epsilon_r' - 1} \quad (2.12)$$

ϵ_r სიდიდედ ცდით მიღებული მნიშვნელობების (ორი ცდა) საშუალო არითმეტიკული ($\bar{\epsilon}_r$) ითვლება და მის გაზომვის ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის ფარდობით დიელექტრიკულ შეღწევადობას (ϵ_r) უწოდებენ.

2.5 ტრანსფორმატორის ზეთში მექანიკური მინარევების განსაზღვრა

ტრანსფორმატორის ზეთის მექანიკური მინარევების შემცველობის დასადგენად მიკროპროცესორული ფოტომეტრული ანალიზატორი – AO3-101 გამოიყენება.

მისი საშუალებით განისაზღვრება 100სმ³ მოცულობის ზეთში მყარი (მექანიკური) ნაწილაკების ჯამური რაოდენობა, რომელთა გეომეტრიული ზომები 2,5 მიკრომეტრიდან 500 მიკრომეტრამდეა. შემდეგ მას ანალიზატორი სხვადასხვა ზომის (დიაპაზონის) მიხედვით ყოფს.

ანალიზისთვის ზეთის ტემპერატურა 20 – 30° C ფარგლებში უნდა იყოს, ხოლო სიბლანტე 150 სანტისტოქს არ უნდა აღემატებოდეს.

ანალიზატორი ერთმანეთთან ელექტრულად და ოპტიკურად დაკავშირებული ბლოკებისგან შედგება (ნახ. 2.6).



ნახ. 2.6 ტრანსფორმატორის ზეთში მექანიკური მინარევების რაოდენობის დასადგენი ფოტომეტრული ანალიზატორი AO3-101.
 1- ოპტიკური ბლოკი; 2 – დოზატორის ბლოკი; 3 – ანალიზატორი;
 4 – სარეველა; 5 – საბეჭდი მოწყობილობა.

1. ოპტიკური ბლოკი მინის კიუვეტაში ჩამონტაჟებულ ფოტომეტრულ მთვლელ-გარდამსახს წარმოადგენს, რომელიც ფოტორეზისტორის საშუალებით მყარი ნაწილაკების რაოდენობას და გეომეტრიული ზომის შესაბამის სიგნალს გასცემს. მისი მართვა ჩამრთველით, „Калибратор“ ხორციელდება. წითელი სასიგნალო ნათურა ბლოკის მუშაობის ინდიკატორია, ხოლო მგრძნობიარობის რეგულირება პოტენციომეტრებით „Чувствительность“ ხდება.

2. დოზატორის ბლოკი, რომლის დანიშნულებაც საანალიზო ზეთის შეწოვა, დოზირება და კიუვეტში გატარება. მისი მართვა ჩამრთველით „сеть“ ხორციელდება, ხოლო მუშაობის ინდიკატორია „ГОТОВ БД“ ნათურით, ზეთის სინჯის დოზების გადამრთველით – „инъем“ 10-დან 100სმ³-ის ჩათვლით, ტუმბოს გაშვების ღილაკებით „ОТСОС“ და „СЛИВ“ ანალიზატორში გატარებული ზეთის მოცულობის ციფრულ ინდიკაციისას ახდენს.

3. ელექტრონული ბლოკი წარმოადგენს სერიულ ანალიზატორს АИ-7-ს, რომლის დანიშნულებაც ოპტიკური ბლოკიდან შემოსული იმპულსების

დათვლა, გაძლიერება, ზომების მიხედვით დაყოფა და ციფრის საბეჭდ მოწყობილობაზე გადაცემა.

4. სარეველას ბლოკის დანიშნულებაა მიმღებ ჭიქაში ზეთის შერევა და საჭირო რაოდენობის სინჯის შეწოვა. მისი მართა ჩამრთველით და ბრუნვათა რიცხვის რეგულირების პოტენციომეტრით ხდება.

5. ციფრის საბეჭდი მოწყობილობის დანიშნულებაა გამოცდის შედეგების გამობეჭდვა ქაღალდზე.

ზეთში შეწონილი ნაწილაკების კიუვეტის ათვლის ზონაში გავლისას მთვლელებზე აღიძვრება იმპულსები, რომელთა ხანგრძლივობა და სიდიდე შეესაბამება ნაწილაკთა ზომებს. ფოტომეტრული მთვლელიდან მიღებული იმპულსები ძლიერდება და შედის ციფრის საბეჭდ მოწყობილობაში, საიდანაც მიიღება ქაღალდზე დაბეჭდილი ინფორმაცია, რომელიც შეიცავს გატარებული ზეთის 100სმ³ მოცულობაში, მექანიკური ნაწილაკების სრულ და ზომების მიხედვით რაოდენობას.

გამოსაკვლევი სითხის გამოცდა შემდეგნაირად მიმდინარეობს: ანალიზატორის კვების ფარზე უნდა ჩაირთოს ანალიზატორის ბლოკების კვების, ცვლადი დენის სტაბილიზატორისა და ციფრსაბეჭდი მოწყობილობის კვების ჩამრთველები. შემდეგ ჩაირთოს ელექტრონული და დოზატორის ბლოკებს კვების ჩამრთველები და დავაცადოთ 15 წთ. რეჟიმზე გასასვლელად. თუკი, ნაწილაკების რეგისტრაციის 0–6 არხი ნორმალურად მუშაობს (ციმციმებს), ხოლო „Чувствительность“-ის მარჯვენა და მარცხენა ინდიკატორები თანაბრად ციმციმებს, გამოვრთოთ ჩამრთველი „Колибратор“ განათების ბლოკზე. სარეველას ბლოკზე ბერკეტით ჩამოვწიოთ მიმღები ჭიქის თარო, ჭიქა გადმოვდგათ მაგიდაზე. ზეთიანი ბოთლი გადავაბრუნოთ რამდენჯერმე ისე, რომ მასში არ გაჩნდეს ჰაერის ბუშტულები და შემდეგ ფრთხილად ჩავასხათ ჭიქაში, რომელსაც კვლავ შევდგამთ თაროზე და ბერკეტით ავწევთ ფიქსირების წერტილამდე. დოზატორის ბლოკზე დოზის მოცულობის გადამრთველით დავაყენოთ გამოცდისათვის აუცილებელი მოცულობა, თუ დოზატორის ბლოკზე ანთია

ინდიკატორი „ГОТОВ БД“ ლილაკის „ОТСОС“ დაწოლით დაიწყება ჭიქიდან ზეთის შეწოვა–გამოცდის პროცესი. იმ შემთხვევაში თუ ეს ინდიკატორი არ აინთო, დავაჭიროთ ლილაკზე „СЛИВ“ და როცა ჰიდროსისტემაში ნარჩენი ზეთი გადაიღვრება ჩაქრება ინდიკატორი „СЛИВ“ და აინთება ინდიკატორი „ГОТОВ БД“. ლილაკზე „ОТСОС“ დაჭერით დაიწყება ზეთის შეწოვა და 10–15 წმ–ის შემდეგ, როცა ზეთი მიაღწევს გამდინარე კიუვეტას ათვლის ზონამდე, აინთება ინდიკატორი „СЧЕТ“. ე.ი. დაიწყება გამოცდა – ანალიზის პროცესი. გამოცდის პროცესი სრულდება, როცა ზეთის მოცემული მოცულობა გაივლის კიუვეტაში და ჩაქრება ინდიკატორი „ОТСОС“. ამის შემდეგ, მუშაობას იწყებს ციფრსაბეჭდი მოწყობილობა.

სტანდარტის მოთხოვნის მიხედვით [24] ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავის კლასის დასადგენად აუცილებელია ნაწილაკების ზომების მიხედვით დაჯგუფება, რასაც ანალიზატორი შვიდ სხვადასხვა დიაპაზონად დაყოფით ახორციელებს (ცხრ. 2.2).

ცხრილი 2.2 ტრანსფორმატორის ზეთში მექანიკური მინარევების ზომების მიხედვით დაყოფა

| ნაწილაკების ზომები | არხი |
|----------------------------|------|
| 0. 2,5მკმ–დან 5000მკმ–მდე; | – |
| 1. 2,5მკმ–დან 5მკმ–მდე; | №1 |
| 2. 5მკმ–დან 15მკმ–მდე; | №2 |
| 3. 15მკმ–დან 25მკმ–მდე; | №3 |
| 4. 25მკმ–დან 50მკმ–მდე; | №4 |
| 5. 50მკმ–დან 100მკმ–მდე; | №5 |
| 6. 100მკმ–დან 200მკმ–მდე; | №6 |
| 7. 200მკმ–დან 500მკმ–მდე. | №7 |

ნაწილაკების რაოდენობის განსაზღვრის ცდომილება 100სმ³ ზეთის შემთხვევაში ± 5% არ აღემატება, რაც სტანდარტის მოთხოვნებს სრულებით აკმაყოფილებს.

მიღებულია, რომ ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრულ მახასიათებლებზე ის მექანიკური ნაწილაკები ახდენს გავლენას, რომელთა გეომეტრიული ზომები 5 მიკრომეტრიდან 15 მიკრომეტრამდე იცვლება

(მეორე არხი – N2). ამის გამო, ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავის კლასის დადგენა ჩვენთან მოქმედი სტანდარტით [23] და საზღვარგარეთის სტანდარტებით (ISO4406, NAS1638) ამ ზომის მქონე ნაწილაკების რაოდენობის მიხედვით წარმოებს (ცხრ. 2.3).

ცხრილი 2.3 ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავის კლასის დადგენის ნორმები

Уровни загрязненности по ГОСТ 17216-71, ISO 4406, NAS 1638
(дано количество частиц в 100 мл масла)

| Класс чистоты ГОСТ 17216-71 | Код ISO 4406 -1987 | NAS 1638 -1964 | Количество частиц размером более 5 мкм | | Количество частиц размером более 15 мкм, не более чем: |
|-----------------------------|--------------------|----------------|--|---------------|--|
| | | | более чем: | не более чем: | |
| 0.0 | 4 / 2 | | 8 | 16 | 4 |
| 0 | 5 / 3 | | 16 | 32 | 8 |
| 1 | 6 / 4 | | 32 | 64 | 16 |
| 2 | 8 / 5 | 0.0 | 130 | 250 | 32 |
| 3 | 8 / 6 | | 130 | 250 | 64 |
| 4 | 9 / 6 | 0 | 250 | 500 | 64 |
| 4 | 10 / 6 | | 500 | 1000 | 64 |
| 5 | 10 / 7 | 1 | 500 | 1000 | 130 |
| 5 | 10 / 8 | | 500 | 1000 | 250 |
| 6 | 11 / 8 | 2 | 1000 | 2000 | 250 |
| 7 | 12 / 9 | 3 | 2000 | 4000 | 500 |
| 8 | 13 / 10 | 4 | 4000 | 8000 | 1000 |
| 9 | 13 / 11 | 5 | 4000 | 8000 | 2000 |
| 9 | 14 / 12 | | 8000 | 16000 | 4000 |
| 10 | 15 / 12 | 6 | 16000 | 32000 | 4000 |
| 11 | 16 / 13 | 7 | 32000 | 64000 | 8000 |
| 12 | 17 / 14 | 8 | 64000 | 130000 | 16000 |
| 13 | 18 / 15 | 9 | 130000 | 250000 | 32000 |
| 13 | 19 / 16 | 10 | 250000 | 500000 | 64000 |
| 14 | 20 / 16 | | 500000 | 1000000 | 64000 |
| 14 | 20 / 17 | 11 | 500000 | 1000000 | 130000 |
| 15 | 20 / 18 | | 500000 | 1000000 | 250000 |
| 16 | 21 / 18 | 12 | 1000000 | 2000000 | 250000 |
| 17 | 23 / 20 | | 4000000 | 8000000 | 1000000 |

Предельно- допустимое значение в эксплуатации по РД 34.45-51.300-97

Верхняя граница НИЦ

- Уровни загрязненности в эксплуатации, рекомендованные СИГРЭ
- уровень загрязненности нормальный
 - уровень загрязненности высокий (возможен отказ оборудования)
 - уровень загрязненности очень высокий (вероятность отказа очень высока)

განხილული არცერთი სტანდარტი მექანიკური ნაწილაკების არც ელექტრულ თვისებებს და არც წარმოშობას არ ითვალისწინებს.

ცხრ. 2.3 ჩანს, რომ თუ მეორე არხის შესაბამისი ნაწილაკების რიცხვი 100სმ³ ზეთში 32000 არ აღემატება, ტრანსფორმატორის ზეთის გაჭუჭყიანება მექანიკური მინარევებით ნორმალურია და ზეთის ექსპლუატაცია დასაშვებია. თუ მათი რაოდენობა 32000–დან 25000–მდეა, მაშინ ზეთი მექანიკური მინარევებით ძლიერ დაბინძურებულია და, შესაძლებელია ავარია. როდესაც მექანიკური ნაწილაკების რაოდენობა 250000 აღემატება, მაშინ მინარევებით გამოწვეული ავარიის ალბათობა მაღალია. ასეთი ზეთის ექსპლუატაცია დაუშვებელია.

ექსპლუატაციაში მყოფი ტრანსფორმატორის ზეთის მდგომარეობის შეფასების ნორმატიული დოკუმენტის მოთხოვნის მიხედვით [25], თუ ელექტრომოწობილობის ნორმალური ძაბვა 220 კილოვოლტს არ აღემატება, მაშინ ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავის ზღვრულ კლასად XIII კლასია მიღებული, რასაც 250000 ნაწილაკი შეესაბამება. უფრო მეტი ძაბვის მოწობილობებისთვის კი სისუფთავის ზღვრულ დასაშვებ კლასად XI მიღებული, რასაც 64000 ნაწილაკი შეესაბამება. აქედან გამომდინარე, ნომინალური ძაბვის გაზრდით ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავისადმი მოთხოვნა იზრდება.

2.6 ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობის განსაზღვრა

სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალებით არის განპირობებული. სითხის მოცულობაში ეს ძალები ერთმანეთს აწონასწორებს, მაგრამ ზედაპირზე მყოფ მოლეკულაზე მოქმედებს გაუწონასწორებელი ძალა, რომელიც ზედაპირიდან მოცულობისკენ არის მიმართული (ნახ. 7ა), ამის გამო, მოცულობიდან ზედაპირზე მოლეკულის გადასატანად საჭიროა გარკვეული მუშაობის შესრულება, რომელიც ამ ძალას დაძლევს. შედეგად, ზედაპირზე მყოფ მოლეკულას გარკვეული პოტენციალური ენერჯია

გააჩნია, რომელსაც ზედაპირულ ენერგიას უწოდებენ. თუ სითხეზე გარეშე ძალები არ მოქმედებს, ეს ენერგია მინიმალურია და სითხის მოლეკულათა ჯგუფს (წვეთს) ზედაპირის მინიმალური ფართი აქვს, ანუ სფეროსებრია.

ზედაპირული ენერგიის ფარდობას წვეთის ფართთან ზედაპირულ დაჭიმულობას უწოდებენ.



ნახ. 2.7 სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის (ა) და განსაზღვრის (ბ) სქემა

მინარევებისგან სუფთა ტრანსფორმატორის ზეთში მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალები დიდია. მინარევები ამ ძალებს ამცირებენ. შესაბამისად, ზედაპირული დაჭიმულობაც მცირდება.

ზეთის დაძველების პროდუქტები უფრო მცირე კონცენტრაციისას ახდენენ ზედაპირული დაჭიმულობის შემცირებას, ვიდრე დიელექტრიკული დანაკარგების გაზრდას, ე.ი. ზედაპირული დაჭიმულობა ზეთის დაძველების დაწყებას ადრეულ სტადიაზე გამოავლენს. ამის გამო, ევროპული სტანდარტების მოთხოვნით ტრანსფორმატორის ზეთის მდგომარეობის შესაფასებლად ზედაპირული დაჭიმულობის განსაზღვრა სავალდებულოა [26].

ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდის განსაზღვრა სითხეში ჩაშვებული ცილინდრული ფორმის ჩარჩოს საშუალებით იმ ძალის განსაზღვრას გულისხმობს, რომელიც ზედაპირიდან სითხის წვეთის მოსაწყვეტადაა საჭირო (ნახ. 2.7ბ). პრაქტიკაში უფრო მარტივი მეთოდი გამოიყენება, რომელიც წინასწარ ცნობილი ზედაპირული დაჭიმულობის მქონე სითხის (გამოხდილი წყალი) წვეთების რაოდენობების ჰაერში და გამოსაკვლევ სითხეში ფარდობით განისაზღვრება.

ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდის განსაზღვრა საწვეთურის დახმარებით ხდება. იგი სპეციალურ შტატივს წარმოადგენს (ნახ. 2.8), რომლის მოსახსნელ მილისებურ სამაგრში ჩადგმულია 2 სმ³ მოცულობის სამედიცინო შპრიცი, 1 მმ შიგა დიამეტრის მომრგვალებული თავიანი ნემსით. შპრიცის დგუში მექანიკურადაა დაკავშირებული მიკრომეტრულ ხრახნთან, რაც გამოხდილი წყლის სტაბილურად ჩამოწვეთების საშუალებას იძლევა. მილისებური სამაგრის ქვემოთ, თაროზე იდგმება 100სმ³ მოცულობის ჭიქა.

ზედაპირული დაჭიმულობის განსაზღვრისათვის ცნობილი უნდა იყოს მოცემულ ტემპერატურაზე გამოხდილი წყლის სიმკვრივე და ზედაპირული დაჭიმულობა. გამოსაკვლევი ზეთის სიმკვრივე ცდით უნდა გაიზომოს. გამოხდილი წყლის სიმკვრივის და ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდეები სპეციალური ცხრილებიდან აიღება (ცხრ. 2.4).



2.8 ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობის გასაზომი ხელსაწყო

აითვლება ნემსიდან გამოდინებული გამოხდილი წყლის წვეთების რაოდენობა ჰაერში და იგივე მოცულობის წყლის წვეთების რაოდენობა

გამოსაკვლევ ზეთში. მუდმივი ტემპერატურისას ნემსიდან ჰაერში გამოყოფილი წვეთების რაოდენობა მუდმივი სიდიდეა და დამოკიდებულია მხოლოდ ტემპერატურაზე. რაც შეეხება გამოსაცდელ ზეთში გამოყოფილ წყლის წვეთების რაოდენობას, იგი მით მეტია, რაც უფრო მეტად დამკველბულია ზეთი. გაზომვის დაწყებამდე შტატივიდან უნდა მოიხსნას დამჭერი მილი. მილის ქვედა ნაწილიდან მოიხსნას დამჭერი ხრახნი და ფრთხილად გამოვიღოთ შპრიცი ნემსთან ერთად.

გამოხდილი წყალი არ უნდა ეკვროდეს შპრიცის ცილინდრის კედლებს და თანაბრად უნდა ჩამოდიოდეს ქვემოთ. თუ ეს ასე არაა, ან კედელზე შეინიშნება ხილული ნალექი, უნდა მოხდეს შპრიცის გარეცხვა 5%-იანი ქრომის ხსნარით, ეთილის სპირტით და ბოლოს გამოხდილი წყლის მრავალჯერადი გამოვლებით.

ცხრილი 2.4 გამოხდილი წყლის სიმკვრივე (ρ) და ზედაპირული დაჭიმულობა (σ) სხვადასხვა ტემპერატურაზე

| $t^{\circ}C$ | σ 10 ⁻³ ნ/მ | ρ გ/სმ ³ | $t^{\circ}C$ | σ 10 ⁻³ ნ/მ | ρ გ/სმ ³ |
|--------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 10 | 74,110 | 0,99973 | 23 | 72,115 | 0,99756 |
| 11 | 73,907 | 0,99961 | 24 | 71,960 | 0,99732 |
| 12 | 73,754 | 0,99949 | 25 | 71,805 | 0,99707 |
| 13 | 73,601 | 0,99937 | 26 | 71,650 | 0,99681 |
| 14 | 73,448 | 0,99925 | 27 | 71,495 | 0,99654 |
| 15 | 73,295 | 0,99913 | 28 | 71,304 | 0,99626 |
| 16 | 73,142 | 0,99897 | 29 | 71,195 | 0,99597 |
| 17 | 72,986 | 0,99880 | 30 | 71,030 | 0,99567 |
| 18 | 72,836 | 0,99862 | 31 | 70,875 | 0,99555 |
| 19 | 72,683 | 0,99843 | 32 | 70,720 | 0,99543 |
| 20 | 72,580 | 0,99824 | 33 | 70,565 | 0,99531 |
| 21 | 72,425 | 0,99802 | 34 | 70,410 | 0,99519 |
| 22 | 72,279 | 0,99780 | 35 | 70,255 | 0,99406 |

სუფთა შპრიცში შეიყვანენ გამოხდილ წყალს 2 სმ³ ნიშნულამდე, გადმოაბრუნებენ და დგუშზე მიწოლით მოცულობას მიიყვანენ 1 სმ³-მდე ისე, რომ მოცულობაში არ დარჩეს ჰაერის ჩანართი. ჩადგამენ შპრიცს დამჭერ მილში, ხოლო დამჭერ მილს დაადგამენ ხელსაწყოს შტატივზე.

შტატივის სადგარზე დადგამენ 100 სმ³ მოცულობის სუფთა ჭიქას და მიკრომეტრული ხრახნით თანაბარი მოძრაობით დაიწყებენ შპრიციდან გამომხდილი წყლის გამოწვევებას, შპრიცის სრულ დაცლამდე. დაითვლიან წვეთების რაოდენობას ჰაერში – R_1 . ნემსის წვეროდან მოუწყვეტელი წვეთი ითვლება ნახევარ წვეთად. გაზომვა ტარდება სამჯერ და იანგარიშება R_1 -ის საშუალო მნიშვნელობა. თუ განსხვავება წვეთების რაოდენობას შორის მეტია 1-ზე, ცდა თავიდან ტარდება. ანალოგიურად ითვლება წყლის წვეთების რაოდენობა ზეთშიც, და დაადგენენ R_2 -ის საშუალო მნიშვნელობას. ცდის ჩატარებისას t ტემპერატურაზე დააფიქსირებენ გამომხდილი წყლის სიმკვრივეს, ზედაპირულ დაჭიმულობას და ზეთის სიმკვრივეს.

ცდით მიღებული და ფიქსირებული სიდიდეების მიხედვით გამოითვლება ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა:

$$\sigma = \frac{R_1}{R_2} (\rho_1 - \rho_2) \sigma_1 \cdot 10^{-3} \text{ნ/მ}, \quad (2.13)$$

სადაც R_1 – წყლის წვეთების საშუალო რაოდენობა ჰაერში t ტემპერატურაზე;

R_2 – წყლის წვეთების საშუალო რაოდენობა ზეთში t ტემპერატურაზე;

ρ_1 – წყლის სიმკვრივე t ტემპერატურაზე;

ρ_2 – გამოსაკვლევი ზეთის სიმკვრივე t ტემპერატურაზე;

σ_1 – გამომხდილი წყლის ზედაპირული დაჭიმულობა t ტემპერატურაზე.

სტანდარტის მიხედვით ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა 25°C ტემპერატურაზე განისაზღვრება. განსხვავებულ ტემპერატურაზე გაზომვისას გამოიყენება შესწორების კოეფიციენტი $\Delta\sigma$:

$$\Delta\sigma = 0,1043(t - 25) \quad (2.14)$$

საბოლოოდ ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა შემდეგი ფორმულით განისაზღვრება:

$$\sigma = \frac{R_1}{R_2} (\rho_1 - \rho_2) \sigma_1 + 0,1043(t - 25) \quad (2.15)$$

2.7 ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხის მაჩვენებლის განსაზღვრა

სინათლის სხივის ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას იცვლება სინათლის სხივის დაცემის და გარდატეხის კუთხეები. ამ კუთხეების სინუსების ფარდობას მოცემულ გარემოში სინათლის სხივის გარდატეხის (ზოგჯერ რეფრაქციის) კოეფიციენტს (n) უწოდებენ. ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხის მაჩვენებელი ზეთის სტრუქტურით არის განპირობებული და ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებელი პარამეტრია.

როგორც ზემოთ განვიხილეთ ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხის მაჩვენებელსა და ფარდობით დიელექტრიკულ შეღწევადობას შორის კავშირს ვერმანის კოეფიციენტი გამოხატავს, რომელიც ზეთის საექსპლუატაციო მდგომარეობის ერთ-ერთი შემფასებელი პარამეტრია.

ტრანსფორმატორის ახალი ზეთისთვის გარდატეხის მაჩვენებელი 1,40–დან 1,45–მდე იცვლება, მაგრამ დაძველებული ზეთებისთვის მისი სიდიდე მიახლოებით 1,5–ს უტოლდება. გარდატეხის მაჩვენებლის გაზრდა ზეთის დაძველების პროდუქტებით არის განპირობებული. რაც მეტია დაძველების პროდუქტები ტრანსფორმატორის ზეთში, მით მეტია გარდატეხის მაჩვენებელი.

გარდატეხის მაჩვენებლის განსაზღვრა ИРФ-454 БМ ტიპის რეფრაქტომეტრით ხდება, რომლის დანიშნულებაა სითხეების გარდატეხის მაჩვენებელი n უშუალოდ განსაზღვრა გამოსხივების D სპექტრში. გარდატეხის მაჩვენებლის სკალის დანაყოფის ფასი 5×10^{-5} ტოლია.

გაზომვისთვის რეფრაქტომეტრი წინასწარ უნდა იყოს მზად. მომზადება გულისხმობს იუსტირების ჩატარებას $20^{\circ}C$ –ზე. თუ იუსტირება

საკონტროლო ფირფიტით ხორციელდება, მაშინ ტემპერატურა $20 \pm 2^{\circ}C$ უნდა იყოს, ხოლო დისტილირებული წყლით იუსტირებისას აუცილებელია ტემპერატურის სიზუსტე $\pm 2^{\circ}C$ –ის ფარგლებში. იუსტირება ტარდება აუცილებლად ახალი რეფრაქტომეტრის აწყობისა და სარემონტო სამუშაოების ჩატარების შემდეგ ან პერიოდულად (თვეში ერთხელ) სისტემური გაზომვების ჩატარების დროს.

იუსტირების დაწყების წინ უნდა შემოწმდეს რეფრაქტომეტრის კომპლექტაცია. თეთრი ნათურა უნდა იდგეს ხელსაწყოს წინ 20–30 სმ-ის დაშორებით ისე, რომ სინათლის სხივი პირდაპირ ეცემოდეს გამანათებელი პრიზმის შემავალ ფანჯარას და სკალის განათების მბრუნავ სარკეს. თერმოსტატის რეზინის მილები უნდა შეუერთდეს რეფრაქტომეტრული ბლოკის ქვედა გამზომი პრიზმის და ზედა გამანათებელი პრიზმის სითხის შემყვანებთან. რეფრაქტომეტრის სისტემაში გაუშვებენ $20 \pm 0,2^{\circ}C$ ტემპერატურის წყალს. გახსნიან გამანათებელ პრიზმას. გამზომი პრიზმის ზედაპირზე დაიტანენ დისტილირებული წყლის 2–3 წვეთს, დაუშვებენ გამანათებელ პრიზმას და ჩაკეტავენ კაუჭით. გახსნიან გამანათებელი პრიზმის ფანჯარას ბოლომდე. ნათურის და მბრუნავი სარკის მოძრაობით სხივს მიმართავენ ისე, რომ მაქსიმალურად განათებული იყოს ოკულარის ზედა ნაწილში წრე ჯვარედინი დიაგონალური ხაზებით და ქვედა ნაწილში გაზომვის სკალა.

მარჯვენა კედლის ქვედა მქნევარას სახელურის ბრუნვით მიღწეულ უნდა იქნეს განათებულ წრეში სიბნელე–სინათლის საზღვრის დამთხვევა დიაგონალური ხაზების გადაკვეთის წერტილთან. თუ სიბნელე–სინათლის საზღვარი ფერებადაა დაშლილი, მის კონტრასტულობას ზედა მქნევარას სახელურის შემობრუნებით აღწევენ. ამის შემდეგ სკალის ვერტიკალური ხაზით აითვლება გარდატეხის მაჩვენებელი n . დისტილირებული წყლისთვის $20 \pm 0,2^{\circ}C$ –ზე $n = 1,3330$ –ს ტოლია.

თუ ხუთჯერადი გაზომვის საშუალო არითმეტიკული არ გასცდება $\pm 5 \times 10^{-5}$ ცდომილების საზღვრებს, რეფრაქტომეტრი იუსტირებულია.

წინააღმდეგ შემთხვევაში, ახდენენ რეფრაქტომეტრის იუსტირების გაღებით კორექტირებას. მარჯვენა კედელზე გახსნიან ხუფს. იუსტირების გასაღების ფრთხილად შემობრუნებით სკალის ვერტიკალურ ხაზს და გაუსწორებენ $n = 1,3330 \pm 5 \cdot 10^{-5}$ მნიშვნელობას.

იუსტირებული რეფრაქტომეტრით სატრანსფორმატორო ზეთის გარდატეხის მაჩვენებლის დადგენა შემდეგნაირად ხდება:

გახსნიან რეფრაქტომეტრის გამანათებელ პრიზმას. მის ზედაპირზე დაიტანენ ზეთის 2–3 წვეთს. დახურავენ გამანათებელ პრიზმას და ჩაკეტავენ. თერმოსტატით მიაღწევენ გამოსაკვლევი ზეთის ტემპერატურას $20 \pm 0,1^{\circ} C$. ჩაატარებენ ზემოთ აღწერილის ანალოგიურად გაზომვას და დააფიქსირებენ n_{20} -ის მნიშვნელობას. გაზომვა ტარდება ზეთის ნიმუშის 3 პორციისათვის. გაზომვების დამთავრების შემდეგ გახსნიან გამანათებელი პრიზმის სახურავს და კარგად გაწმენდენ პრიზმის ზედაპირებს. ზედაპირებს შორის მოათავსებენ ფლანელის ნაჭერს და დახურავენ.

გამოსაკვლევი ზეთის გარდატეხის მაჩვენებლის სიდიდე იანგარიშება, როგორც სამი გაზომილი სიდიდის საშუალო არითმეტიკული. თუკი გაზომვა მოხდა $20^{\circ} C$ -დან განსხვავებულ პირობებში n_{20} საშალო მნიშვნელობა მიიყვანება $20^{\circ} C$ -ზე ფორმულით:

$$n_{20} = n_t + \alpha(t - 20) \quad (2.16)$$

სადაც α ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხის კოეფიციენტის ტემპერატურული კოეფიციენტია და $\alpha = 0,0003$, ხოლო t გაზომვის ტემპერატურაა.

დასკვნა თავი 2-ის მიმართ

1. ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის განსაზღვრა მეტროლოგიურად შემოწმებულ АИМ-90 ტიპის ხელსაწყოს გამოყენებით ექვსი პარალელური ცდით წარმოებს;

2. ტრანსფორმატორის ზეთის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის და დიელექტრიკული დანაკარგების განსაზღვრა ცვლადი ძაბვის ბოგირით ერთი და იმავე ტემპერატურაზე ხდება. ტემპერატურის გაზრდით დიელექტრიკული დანაკარგები იზრდება, ხოლო ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა მცირდება;
3. ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა მინარევების ან ზეთის დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდით მცირდება. მისი შემცირება ზეთის დაძველებას უფრო ადრე გამოვლენს, ვიდრე დიელექტრიკული დანაკარგების გაზრდა;
4. ტრანსფორმატორის ზეთში მყარი ნაწილაკების (მექანიკური მინარევები) რაოდენობა, რომელთა ზომები 5–დან 15 მიკრონამდეა 100 სმ³ ზეთში, ზეთის სისუფთავის კლასის დასადგენი პარამეტრია;
5. სამუშაოს შესრულებისას აუცილებელი იყო ტრანსფორმატორის ზეთის მჟავური რიცხვის, წყალში ხსნადი ჟავებისა და ტუტეების რაოდენობის, ტენშემცველობის სიმკვრივის და სხვა პარამეტრების განსაზღვრა, მაგრამ ეს ნაშრომის მოცულობის გაზრდას გამოიწვევდა, ამის გამო, მათი განხილვა მიზანშეწონილად არ ჩავთვალეთ.

თავი 3. ზეთების და დაძველების პროდუქტების მომზადება

3.1 ტრანსფორმატორის ზეთები და მათი საწყისი მახასიათებლები

ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტების ახალი და რეგენირებული ზეთების თვისებებზე გავლენის შესწავლის მიზნით ცდებისთვის შემდეგი სახის ზეთები მომზადდა.

1. ნიდერლანდური ფირმის *NYNAS* მიერ ევროპული სტანდარტების მოთხოვნების მიხედვით დამზადებული *Nytro 11GX* მარკის ზეთი, რომელიც თანაბარი რაოდენობით ნაფტენურ და პარაფინულ ნახშირწყალბადებს შეიცავს, ხოლო არომატული ნახშირწყალბადების რაოდენობა 1,2%-ს არ აღემატება (ნახ. 3.1). გამოირჩევა მაღალი სტაბილურობით და წინასწარ მომზადებულია ელექტრომოწყობილობაში ჩასასხმელად, ე.ი. ის არ წარმოადგენს ნედლ ზეთს.

რადგან სასურველი იყო ამ ზეთის ტენშემცველობა 10 ppm-მდე შეგვემცირებინა, ამის გამო მას 10 მილიმეტრი ვერცხლის წყლის წნევაზე და 50°C ტემპერატურაზე, 30 წუთით ვაკუუმირება ჩაუტარდა, რის შედეგად ტენშემცველობა 9,2 ppm შემცირდა, ხოლო გამრღვევი ძაბვა 68 კილოვოლტამდე გაიზარდა.

2. ბაქოს ნავთობგადამამუშავებელი ქარხნის „*Азербейтъяг*“ მიერ წარმოებული *T-1500* მარკის ტრანსფორმატორის ახალი ზეთი რუსული სტანდარტების მიხედვით არის წარმოებული და ჩვენთან ფართოდ გამოიყენება [27]. სერთიფიკატის მიხედვით მისი მახასიათებლები საერთაშორისო სტანდარტებს აკმაყოფილებს (ნახ. 3.2) და ფილტრაციის დეგაზაციის და შრობის შემდეგ მისი გამოყენება 110 კილოვოლტი და მეტი ძაბვის მოწყობილობებში შეიძლება (ცხრ. 3.1).

Inspectorate Antwerp NV
 Noorderlaan 183
 2030 Antwerpen
 Belgium
 Tel: +32 (0)3 546 08 88
 Fax: +32 (0)3 546 08 80
 operations@inspectorate.be
 www.inspectorate.com



INSPECTORATE

CERTIFICATE OF ANALYSIS

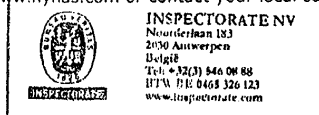
Sample submitted as: **Nytro 11GX**
 Marked: **TRANSFER**
 U-M-L samples taken ex tank **331**
 Batch No: 98-T331-130227
 Location: LBC - Antwerp
 Nynas Ordernumber: UA-2013-04 1
 Date of sampling: 28-feb-2013
 Our ref No: N2013/2222/LN2620

Analysis performed on a composite T/M/B sample from shore tank

| Analysis | Method | Unit | Nytro 11GX |
|-----------------------------|------------|--------------------|--------------|
| Density at 15°C (vac.) | ASTM D4052 | kg/dm ³ | 0,8747 |
| Density at 20°C (vac.) | ASTM D4052 | kg/dm ³ | 0,8716 |
| Viscosity at 40°C | ASTM D445 | mm ² /s | 9,15 |
| Flash point, PM | ASTM D93A | °C | 148 |
| Colour ASTM | ASTM D1500 | | L 0,5 |
| Neutralization value | ASTM D974 | mgKOH/g | < 0,01 |
| Refractive index at 20°C | ASTM D1747 | | 1,4758 |
| Aniline point | ASTM D611 | °C | 83,6 |
| Appearance at 15°C | ASTM D4176 | | Clear&Bright |
| Hydrocarbon Type Analysis | ASTM D2140 | | |
| C _A | | % | 1,2 |
| C _P | | % | 47,9 |
| C _N | | % | 50,9 |
| Breakdown Voltage | IEC 60156 | kV | 61 |
| Tan delta at 90°C | IEC 60247 | decimals | 0,0004 |
| Water (Karl Fischer) | IEC 60814 | ppm | 12 |
| Interfacial tension at 25°C | ASTM D971 | mN/m | 49,7 |
| Oxidation Stability | IEC 1125 C | | |
| Total acidity - 500 h | | mg KOH/g | 0,06 |
| Sludge - 500 h | | % Wt | 0,01 |
| Tan delta at 90°C - 500 h | | | 0,011 |
| Ag-corrosion | DIN 51353 | | non-corr. |
| Cu-corrosion | ASTM D1275 | | non-corr. |
| Corrosive sulphur | IEC 62535 | | non-corr. |

Nynas AB guarantee that this batch are free from detectable PCB compound, measured in accordance to ASTM D4059 or IEC 61619.

All test results in this CoA comply with specified limits in the corresponding Nynas AB Product Data Sheet (PDS). For the latest PDS edition or for complete Nynas AB specifications regarding specific products, please visit www.nynas.com or contact your local sales contact.



Inspectorate Antwerp NV

Henk Henkens

Certified to ISO 9001

ՏձԵ. 3.1 Nytro 11GX մարզի Ֆյետիս սերտոյցաճԻ



«Azarneftyağ» NEZ
НПЗ «Азернефтьяз»

PASPORT № 316
ПАСПОРТ

«Azarneftyağ»
Neft Emalı Zavodu
Sex № 14

T-1500 markalı transformator yağı
Масло трансформаторное марки T-1500

ГОСТ 982-80 dəyişiklik № 1-3

ГОСТ 982-80 с изм. № 1-3

Məhsulun hazırlanma tarixi
Дата изготовления продукта 20/V-12

Çənin nömrəsi
Номер резервуара 45

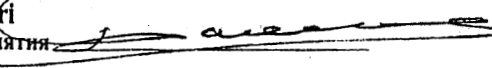

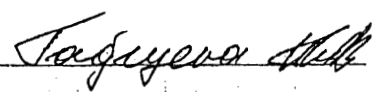
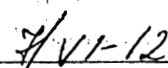
Çəndə məhsulun ölçüsü
Замер резервуара 7.526m

ОКП 02 5376 0105

| No№ | Göstəricilərin adı Наименование показателей | Norma Норма | Faktiki Фактически |
|-----|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Kinematik özlülük, m ² /s (s St), çox olmamalı: Вязкость кинематическая, м ² /с (сСт), не более: 50°C-də при 50°C mənfi 30°C-də при минус 30°C | 8 · 10 ⁻⁶ (8) 1100 · 10 ⁻⁶ (1100) | 7,61 · 10 ⁻⁶ (7,61) 989,0 · 10 ⁻¹ (989,0) |
| 2 | Turşu ədədi, mq KOH 1 q. yağa, çox olmamalı Кислотное число, мг KOH на 1г. масла, не более | 0,01 | 0,0028 |
| 3 | Alışma temperaturu, təyin olunmuş qaralı putada, °C, aşağı olmamalı Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °C, не ниже | 135 | 141 |
| 4 | Suda həll olan turşu və qələvilərin kütlə payı Содержание водорастворимых кислот и щелочей | Yoxdur Отсутствие | Yoxdur Нет. |
| 5 | Mexaniki qarışıqların kütlə payı Содержание механических примесей | Yoxdur Отсутствие | Yoxdur |
| 6 | Donma temperaturu, °C, uxaqı olmamalı Температура застывания, °C, не выше | Mənfi 45 Минус 45 | mənfi 45 |
| 7 | Natr ədədi, optiki sıxlıq, çox olmamalı Натровая проба, оптическая плотность, не более | 0,4 | 0,28 |
| 8 | Şəffaflıq, 5 °C-də Прозрачность при 5°C | Davam götürür Выдерживает | daşın gətir |
| 9 | Rəng, ЦНТ kalorimetrində ЦНТ vahidi ilə, çox olmamalı Цвет на колориметре ЦНТ, ед. ЦНТ, не более | 1,5 | 1,0 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|---|-----------------------------|----------------|
| 10 | Oksidleşməyə qarşı stabillik, çox olmamalı: Стабильность против окисления, не более: aşağı molekullu uçucu turşuların kütlə payı, mq KON 1 q. yağa масса летучих низкомолекулярных кислот, мг КОН на 1г. масла qalıqın kütlə payı, %-lə массовая доля осадка oksidleşmiş yağın turşu ədədi, mq KON 1 q yağa кислотное число окисленного масла, мг КОН на 1г масла | 0,04 | 0,012 |
| | | Yoxdur Отсутствие 0,2 | Yoxdur 0,15 |
| 11 | Dielektrik itkilərin tangensi bucağı, 90°C-də, %-lə, çox olmamalı Тангенс угла диэлектрических потерь при 90°C, %, не более | 0,5 | 0,35 |
| 12 | Sıxdıq 20 °C-də, q/sm ³ , çox olmamalı Плотность при 20°C, г/см ³ , не более | 0,885 | 0,8782 |

Nəticə: Məhsul ГОСТ 982-80 müvafiqdir.
Заключение: Продукт соответствует ГОСТ 982-80
Məhsul təhlükəsizliyin IV sinfinə aiddir.
Attestat № AZ 031.01.11.0216.07

Müəssisənin rəhbəri
Руководитель предприятия 
MZL-nin rəisi
Начальник главной лаборатории 
Növbətçi laborant
Дежурный лаборант 
Pasportun verilmə tarixi
Дата выдачи паспорта 

Şəx. 3.2 T – 1500 märke axalı (nedli)şetis serotifikaçı

enerqosiskemembi arsebuli şetiot şevsebul elpektrotexnikur monyobilobembi ekspluatatsiyamı umetesa T – 1500 märke şetio gamoiyena. tu şetio naklebad dadevelebulia, mam mis reqeneratsias xdenen. amis gamo, cdebi am märke reqenirebul şetioe xatarada. is reqenirebuli şetiois motxovenes akmayofilebada da tavisi maxasiateblebit axlos iyo T – 1500 märke saexpluatatsiod momxadebul axal şetioan (cbr. 3.2).

**ცხრილი 3.1 საექსპლუატაციოდ მომზადებული ტრანსფორმატორის
T – 1500 მარკის ახალი ზეთის მახასიათებლები**

| № | მახასიათებელი სიდიდე | სტანდარტი | განზომილება | t°C | შედეგი | ნორმა |
|----|--|-----------------|----------------------|-----|----------------------|-----------------------|
| 1 | ფერი | ASTM D1500 CS | ბალი | | 1.0 | ≤1.5 |
| 2 | სიმკვრივე | ГОСТ 3900-85 | კგ/მ ³ | 20 | 878.6 | ≤885 |
| 3 | კინემატიკური სიბლანტე | ГОСТ 33-82 | სსტ | 20 | 21.10 | ≤28 |
| | | | | 50 | 7.65 | ≤8 |
| 4 | რეფრაქციის კოეფიციენტი | ГОСТ 18995.2-73 | – | 18 | 1.4861 | ≤1.500 |
| 5 | ფეთქის ტემპერატურა | ГОСТ 6356-75 | °C | | 136 | ≥135 |
| 6 | ზედაპირული დაჭიმულობა | ASTM D2285 -85 | 10 ⁻³ ნ/მ | 25 | 46.4 | ≥40 |
| 7 | მჟავური რიცხვი | ГОСТ 5985-79 | მგKOH/1გზეთზე | | 0.0025 | ≤1.01 |
| 8 | წყალში ხსნადი მჟავები და ტუტეები | ГОСТ 6307-75 | მგKOH/1გზეთზე | | ნეიტრალური | ნეიტრალური |
| 9 | მექანიკური მინარევების შემცველობა (სისუფთავის კლასი 17216–71) Σ ნაწილაკების 100მლ ზეთში | IEC-970 | კლასი | | 9 | ≤13 |
| | | | Σ | | | |
| 10 | სტაბილურობა დაჟანგვის მიმართ მჟავური რიცხვი ნალექის მასური წილი დაბალმოლეკულური მჟავების მასური წილი | ГОСТ 981-75 | მგKOH/1გზეთზე | | 0.13 | ≤0.2 |
| | | | % | | არ აღმოჩნდა | არ აღმოჩნდა |
| | | | მგKOH/1გზეთზე | | 0.023 | ≤0.04 |
| 11 | იონოლის შემცველობა | РД 34.43.105-89 | % | | 0.4 | ≥0.4 |
| 12 | სტრუქტურულ-ჯგუფ. შემადგენლობა Ca Cn Cp | ASTM D2140-94 | % | | 11.8 | – |
| | | | | | 34.7 | |
| | | | | | 53.5 | |
| 13 | დიელექტრიკული დანაკარგები | ГОСТ 6581-75 | % | 20 | 0.021 | – |
| | | | | 90 | 0.22 | ≤0.5 |
| 14 | კუთრი წინაღობა | ГОСТ 6581-75 | ომ.მ | 20 | 2.5×10 ¹³ | |
| | | | | 90 | 2.3×10 ¹¹ | ≥1.0×10 ¹⁰ |
| 15 | დიელექტრიკული შეღწევადაობა | ГОСТ 6581-75 | | 20 | 2.25 | ≤2.3 |
| 16 | ვერმანის კოეფიციენტი | - | | | 0.042 | ≤0.05 |
| 17 | სიმღვრივე | ГОСТ 19296-85 | მ ⁻¹ | | 26.2 | |
| 18 | გამჭვირვალობა 5°C-ზე | ГОСТ 982-80 | | | გამჭვირვალე | გამჭვირვალე |
| 19 | ნატრიუმის სინჯი | ГОСТ 19296-85 | ბალი | | 0.35 | ≤0.4 |
| 20 | ტენშემცველობა | | ppm | | 10 | 10 |
| 21 | გამღრვევი ძაბვა | ГОСТ 6581-75 | კვ | 20 | 66 | >60 |

ცხრილი 3.2 ტრანსფორმატორის T – 1500 მარკის რეგენირებული ზეთის მახასიათებლები

| № | მახასიათებლები | განზომილება | შედეგი | ნორმა | |
|----|--|-------------------|--------|-------|----------------|
| | | | | ახალი | საექსპლუატაციო |
| 1. | სიმკვრივე (20°C) | კგ/მ ³ | 852 | - | <900 |
| 2. | სიბლანტე (50°C) | სსტ | 6.6 | - | |
| 3. | ზედაპირული დაჭიმულობა (t=25°C) რეფრაქციის კოეფიციენტი (20°C) სტრუქტურა | კნ/მ | 41.3 | >32 | 28 |
| | C _A | - | 1.4751 | - | - |
| | C _P | % | 12.5 | - | - |
| | C _N | | 47.7 | - | - |
| | მჟავური რიცხვი | მგრKOH/1გრ | 39.8 | - | - |
| | ტენშემცველობა | მგრKOH/1გრ | 0.004 | 0.1 | 0.25 |
| | გამრღვევი ძაბვა | ppm | 10.1 | ≤10 | 25 |
| | დიელექტრიკული დანაკარგები tგდ(90°C) | კვ | 64 | >60 | 35 |
| | კუთრი წინაღობა 20°C | % | 0.4 | <0.5 | 1.5 |
| | 90°C | - | - | - | - |
| | მექანიკური მინარევები | 10მმი.მ | 67 | - | - |
| | | კლასი | IX | XI | XIII |

ცდისთვის მომზადებულ ახალი და რეგენირებული ზეთების მახასიათებლები საწყის მდგომარეობაში თითქმის მსგავსია და აკმაყოფილებელ ელექტრომოწყობილობაში ჩასასხმელად მომზადებული ახალი და რეგენირებული ზეთის ნორმის მოთხოვნებს [25].

3.2 ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტების მომზადება

ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტები გამოყოფილი იყო T – 1500 მარკის ტრანსფორმატორის დაძველებული ზეთისგან, რომელიც საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნებს არ აკმაყოფილებდა. ეს ზეთი რეგენერაციის შემდეგ ცდებში ჩვენს მიერ გამოყენებული იყო, როგორც

T – 1500 მარკის რეგენირებული ზეთი. ამდაგვარად დაძველების პროდუქტები, რომლებიც ცდებში გამოვიყენეთ მახასიათებელია T – 1500 მარკის ზეთის.

დაძველების პროდუქტები ზეთისგან ფილტრაციის და მრავალჯერადი დალექვის საშუალებით გამოიყო. ისინი მცირე რაოდენობის ზეთში იყო გახსნილი და მასში ზეთის დაძველების ყველა ფრაქცია და ნაწილაკი შეიმჩნეოდა და შემდეგი მახასიათებლები გააჩნდა (ცხრ. 3.3)

ცხრ. 3.3 ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტების მახასიათებლები

| № | მახასიათებლები | განზომილება | შედეგი |
|---|-----------------------------------|--|--------|
| 1 | ტენშემცველობა | ppm | 48.3 |
| | მჟავური რიცხვი | $\frac{\text{მგრKOH}}{\text{გრზეოზე}}$ | 0.32 |
| | წყალში ხსნადი მჟავების და ტუტეები | $\frac{\text{მგრKOH}}{\text{გრზეოზე}}$ | 0.15 |
| | ზედაპირული დაჭიმულობა | ნ/მ | 23.3 |
| | სიმკვრივე | კგ/დმ ³ | 0.891 |
| | გარდატეხის კოეფიციენტი | – | 1.4939 |
| | მექანიკური მინარევები | ნაწილაკები 100სმ ³ ზეთში | |
| | ჯამი | – | 126390 |
| | 1. 2,5მკმ–5მკმ | – | 357618 |
| | 2. 5მკმ–15მკმ | – | 649791 |
| | 3. 15მკმ–25მკმ | – | 229594 |
| | 4. 25მკმ–50მკმ | – | 30833 |
| | 5. 50მკმ–100მკმ | – | 1509 |
| | 6. 100მკმ–200მკმ | – | 47 |
| | 7. 200მკმ–500მკმ | – | 0 |
| | ფერი | ბალი | 6 |

როგორც ცხრილიდან ჩანს, დაძველების ძირითადი ფრაქცია 50 მიკრომეტრამდე ზომისაა, რაც რეალურ მდგომარეობას შეესაბამება. გააჩნია ნორმის ქვედა ზღვარზე ნაკლები ზედაპირული დაჭიმულობა და ნორმის ზედა ზღვარს მიახლოებული გარდატეხის კოეფიციენტის სიდიდე, ხოლო ფერი 6 ბალს აღემატება.

დაძველების პროდუქტების დიდ ტენშემცველობას გამოსაკვლევი ზეთების ტენშემცველობა რომ არ შეეცვალა, ამისთვის მას 10 მილიმეტრი ვერცხლის წყლის წნევაზე და 50° C ტემპერატურაზე შრობა ჩაუტარდა. რის შედეგად მისი ტენშემცველობა 10 ppm–მდე შემცირდა, ე.ი. საცდელი ზეთების ტენშემცველობას გაუტოლდა.

ცდებისთვის მომზადებული ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტები რეალურ მდგომარეობას შეესაბამება და მცირე ტენშემცველობა გაჩნდა, რაც ცდის შედეგებზე ტენის გავლენას გამორიცხავს. გამოსაკვლევი ზეთის თვისებებზე მხოლოდ ზეთის დაძველების მყარი ნაწილაკები და ზეთში ხსნადი პროდუქტები ახდენს გავლენას.

3.3 გრაფიტის ნაწილაკების მომზადება

ცნობილია, რომ ტრანსფორმატორის ზეთში ნაწილობრივი გარღვევის მიმდინარეობისას ადგილი აქვს ზეთის მოლეკულების დაშლას, რის შედეგად სხვადასხვა სახის აირები და თავისუფალი გრაფიტი გამოიყოფა, რომელიც საგრძნობ გავლენას ახდენს ზეთის ელექტრულ მახასიათებლებზე.

ზეთის დაშლით წარმოქმნილი გრაფიტის ნაწილაკების ზომები 50 მიკრომეტრს არ აღემატება და ზეთში შეტივტივებულები არიან, ხოლო მეტი ზომის ნაწილაკები გამოილექებიან.

რადგან ზეთის დაძველების პროდუქტებიდან გრაფიტის გამოყოფა პრაქტიკულად შეუძლებელი იყო, ამის გამო ახალი და რეგენირებული ზეთის თვისებებზე გრაფიტის ნაწილაკების გავლენის შესწავლის მიზნით გრაფიტის მტვერი ელექტროტექნიკური ნახშირისგან დამზადდა.

მიღებული მტვერი 70 მიკრონის უჯრედების მქონე მეტალის საცერში გატარდა, რის შედეგად დიდი ზომის ნაწილაკების რაოდენობა მინიმუმამდე შემცირდა, ეს კი რეალურ მდგომარეობას შეესაბამება.

რადგან გრაფიტის მტკერის ნაწილაკები შენახვისას ერთმანეთთან კავშირს ამყარებენ და ტრანსფორმატორის ზეთში ცუდად იხსნებიან, ამის გამო, გრაფიტის ნაწილაკების გაცრა უშუალოდ ზეთში გახსნის წინ ხდებოდა.

ყველა სახის მინარევები ზეთში თანდათანობით ხანგრძლივი არევით იხსნებოდა. თუ ნალექი წარმოიქმნებოდა, მაშინ ნალექი ზეთიდან გამოიყოფოდა, რადგან ჩვენს მიზანს ტრანსფორმატორის ზეთში შეტივტივებული ნაწილაკების გავლენის შესწავლა წარმოადგენდა.

ხელოვნურად მომზადებული გრაფიტის ნაწილაკები ზომებით და თვისებებით ტრანსფორმატორის ზეთში ნაწილობრივი განმუხტვით წარმოქმნილი გრაფიტის ნაწილაკების ანალოგიურია.

დასკვნა თავი 3–ის მიმართ

1. ცდისთვის მომზადებული ახალი და რეგენირებული ზეთების მახასიათებლები საწყის მდგომარეობაში თითქმის მსგავსია და აკმაყოფილებენ ელექტრომომწობილობაში ჩასასხმელად მომზადებული ახალი და რეგენირებული ზეთების ნორმის მოთხოვნებს;
2. ცდებისთვის მომზადებული ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტები რეალურ მდგომარეობას შეესაბამება და მცირე ტენშემცველობა გააჩნია, რაც ცდის შედეგებზე ტენის გავლენას გამორიცხავს;
3. გამოსაკვლევი ზეთის თვისებებზე მხოლოდ ზეთის დაძველების მყარი ნაწილაკები და ზეთში ხსნადი პროდუქტები ახდენს გავლენას;
4. ხელოვნურად მომზადებული გრაფიტის ნაწილაკები ზომებით და თვისებებით ტრანსფორმატორის ზეთში ნაწილობრივი განმუხტვით წარმოქმნილი გრაფიტის ნაწილაკების ანალოგიურია.

თავი 4. მინარევების გავლენა ახალი და რეგენირებული ზეთის თვისებებზე

4.1 ტრანსფორმატორის ზეთების საწყისი მახასიათებლები

ახალი ზეთის თვისებებზე მინარევების გავლენის შესწავლის მიზნით ცდებში გამოყენებული იყო „NUNAS“ ფირმის მიერ დამზადებული *Nytro 11GX* და ბაქოს ნავთობგადამამუშავებელი ქარხნის მიერ წარმოებული T-1500 მარკის ახალი ზეთები. ამასთანავე, ცდები ჩატარდა T-1500 მარკის ექსპლუატაციისას დაძველებულ და შემდეგ რეგენირებულ ზეთზე. ამ ზეთების საწყისი მახასიათებლები მოყვანილია ცხრილ №4.1-ში.

ცხრილი 4.1 ცდებში გამოყენებული ზეთების საწყისი მახასიათებლები

| № | მახასიათებლები | განზომილება | T-1500 ახალი | T-1500 რეგენირებული | Nytro 11GX | ნორმა | |
|-----|--------------------------------------|------------------------|--------------|---------------------|------------|-------|----------------|
| | | | | | | ახალი | საექსპლუატაციო |
| 1. | სიმკვრივე (20°C) | კგ/მ ³ | 850 | 852 | 865 | – | <900 |
| 2. | სიბლანტე (50°C) | სსტ | 6,6 | 6,6 | 7,5 | – | |
| 3. | ზედაპირული დაჭიმულობა (t=25°C) | კნ/მ | 42,2 | 41,3 | 49,5 | >32 | 28 |
| 4. | რეფრაქციის კოეფიციენტი (20°C) | – | 1,4738 | 1,4751 | 1,4748 | – | <1,5 |
| 5. | სტრუქტურა | % | | | | | |
| | C _A | | 12,5 | 12,5 | 2,6 | – | – |
| | C _P | | 47,7 | 47,7 | 53,2 | – | – |
| | C _N | | 39,8 | 39,8 | 44,3 | – | – |
| 6. | მჟავური რიცხვი | მგKOH/1გრ | 0,0035 | 0,004 | <0,001 | 0,1 | 0,25 |
| 7. | ტენზომცველობა | ppm | 10 | 10,1 | 9,2 | ≤110 | 25 |
| 8. | გამრღვევი ძაბვა | კვ | 66 | 64 | 68 | >60 | 35 |
| 9. | დიელექტრიკული დანაკარგები tგდ (90°C) | % | 0,35 | 0,4 | 0,04 | <0,5 | 1,5 |
| 10. | კუთრი წინაღობა 20°C | – | – | – | – | – | – |
| | 90°C | 10 ¹⁰ ომი.მ | 75 | 67 | 115 | – | – |
| 11. | მექანიკური მინარევები | კლასი | X | IX | IX | XI | XIII |

როგორც ცხრილიდან ჩანს, სამივე ზეთი აკმაყოფილებს საექსპლუატაციოდ მომზადებული ახალი ზეთის ნორმის მოთხოვნებს და რეკომენდებულია ექსპლუატაციისათვის. *Nytro 11GX* თითქმის ოთხჯერ ნაკლებ არომატულ ნახშირწყალბადებს შეიცავს, ვიდრე *T-1500* მარკის ზეთები.

ზეთებში ექსპლუატაციისთვის უვარგისი დაძველებული ზეთიანი ტრანსფორმატორიდან ამოღებული ზეთის დაძველების პროდუქტები იხსნებოდა, რომელიც წინასწარ გამშრალი იყო და განსაზღვრული რაოდენობით სამივე სახის ზეთში მექანიკური არევით 24 საათის განმავლობაში სრულ გახსნამდე ყოვნდებოდა. დაყოვნება აუცილებელი გახდა იმის გამო, რომ დაძველების პროდუქტების ნაწილაკებს კავშირი დაემყარებინა ზეთის მოლეკულებთან. ამით მექანიკური ნარევი გამოგვერიცხა.

საკვლევ ზეთში დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდა ზეთის ფერის მნიშვნელოვან ცვლილებას იწვევდა (ნახ. 4.1), მაგრამ ზეთის ტენშემცველობა უცვლელი იყო, რადგან მინარევები წინასწარ შრებოდა.

როგორც წესი, ნალექის სახით გამოყოფილი ზეთის დაძველების პროდუქტები მაღალი მჟავური რიცხვით ხასიათდებიან, მაგრამ ზეთის მასასთან შედარებით (800–1000გრ) გახსნილი მინარევების რაოდენობა (5–7გრ) მცირე რაოდენობის იყო და მინარევების 10 გრამამდე გახსნის შემთხვევაშიც კი საკვლევ ზეთების მჟავური რიცხვი 2%-ზე მეტად არ იზრდებოდა, რაც საკვლევ ზეთის მახასიათებლებზე ზეთის მჟავური რიცხვის ზრდას გამორიცხავდა. ეს მოვლენა საექსპლუატაციო მდგომარეობას შეესაბამება.

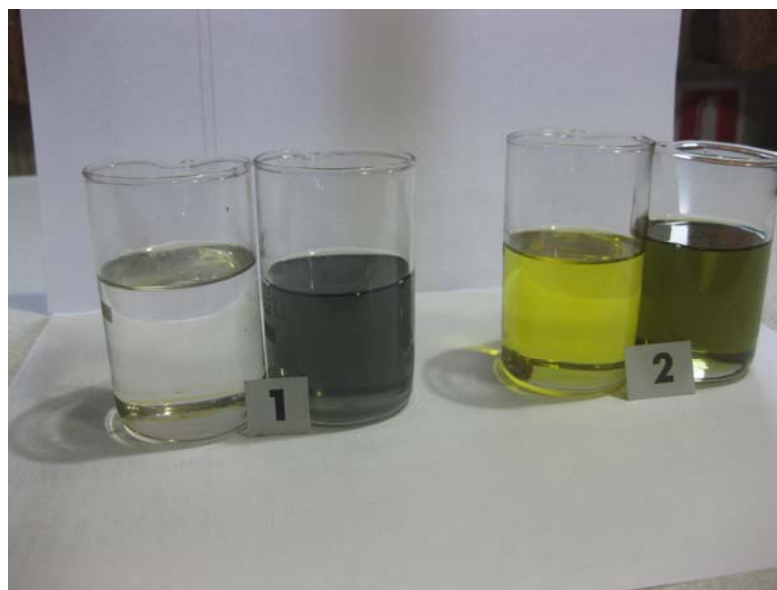
ტრანსფორმატორის ზეთში ნაწილობრივი გარღვევის შედეგად სხვა პროდუქტებთან ერთად ნახშირბადის ნაწილაკები გრაფიტის სახით გამოიყოფა, რომელთა ზომები 50 მიკრონს არ აღემატება.

ამის გამო, ნახშირბადის ნაწილაკების მინარევების გავლენის შესაფასებლად ახალი ზეთის თვისებებზე ცდებში გამოყენებული იყო

ელექტროტექნიკური გრაფიტის ფხვნილი, რომელიც წინასწარ 70მიკრონი ცხურის მქონე საცერში იცრებოდა და შემდეგ ზეთში იხსნებოდა. რა თქმა უნდა, გრაფიტის ნაწილაკებიც იწვევდა ზეთის ფერის ცვლილებას (ნახ. 4.2), მაგრამ გრაფიტით გამოწვეული ფერის ცვლილება უფრო ნაკლები იყო, ვიდრე დაძველებით წარმოქმნილი მინარევებით გამოწვეული.



ნახ. 4.1 დაძველების პროდუქტებით ტრანსფორმატორის ზეთის ფერის ცვლილება. 1 – Nytro და 2 – T-1500



ნახ. 4.2 გრაფიტის ნაწილაკებით ტრანსფორმატორის ზეთის ფერის ცვლილება. 1 – Nytro და 2 – T-1500

ზემოთ განხილულიდან გამომდინარე, ცდებში საკვლევი ზეთების თვისებების ცვლილებას მასში გახსნილი ზეთის დაძველების პროდუქტების მინარევების ნაწილაკები ახდენს, ხოლო ტენისა და მჟავური რიცხვის გავლენა პრაქტიკულად უმნიშვნელოა.

რადგან სტანდარტით მიღებულია, რომ ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავის კლასი შეფასდეს 100სმ^3 ზეთში გახსნილი მინარევების იმ რაოდენობით, რომელთა გეომეტრიული ზომები 5–დან 15 მიკრომეტრამდეა [24] ამ ზომის ნაწილაკები, ნაწილაკების მთვლელი ფოტონალიზატორის მეორე არხში ხვდება და მას შესაბამისად N_2 აღნიშნავენ, მაგრამ მინარევების გავლენის შეფასების მიზნით, აგრეთვე, საინტერესო იყო მინარევების საერთო (ჯამური) რაოდენობა ($N_{\text{ჯამი}}$).

უნდა აღინიშნოს, რომ N_2 და $N_{\text{ჯამი}}$ შორის მიახლოებითი პროპორციული დამოკიდებულება არსებობს და $N_{\text{ჯამი}}$ გაზრდა ყოველთვის იწვევს შესაბამისი სიდიდით N_2 გაზრდას, ამის გამო დამოკიდებულების გრაფიკების ასაგებად N_2 რაოდენობა გამოვიყენეთ.

4.2 ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთების გამრღვევი ძაბვის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე

ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდე ($U_{\text{გამ}}$) ზემოთგანხილული სტანდარტული მეთოდით ექვსი ცდის საშუალებით ისაზღვრებოდა. უნდა აღინიშნოს, რომ მთელი ცდების განმავლობაში $U_{\text{გამ}}$ განსაზღვრის საშუალო კვადრატული გადახრა 1,5 კვ–ს არ აღემატებოდა, ხოლო ტრანსფორმატორის ზეთის ერთგვაროვნების შემფასებელი გამრღვევი ძაბვის მიხედვით ვარიაციის კოეფიციენტი (γ) 3,9% ნაკლები იყო, რაც იმას მიუთითებს, რომ ზეთები ერთგვაროვანია, ანუ დაძველების პროდუქტები ან ნახშირბადის ნაწილაკები ზეთში თანაბრად არის განაწილებული.

დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდით სამივე სახის ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდე მცირდება (ცხრ. 4.2), მაგრამ თუ *Nytro* მარკის ზეთში $U_{გამ. კვ}$ შემცირდება ნაწილაკების რიცხვის (N_2) გაზრდით თითქმის სწორხაზოვანია, $T-1500$ მარკის ახალი და დაძველებული ზეთებისთვის ამ დამოკიდებულების ექსპონენციალური სახე აქვს (ნახ. 4.3). ამასთანავე, შემცირება უფრო $T-1500$ მარკის რეგენირებულ ზეთშია გამოხატული, ვიდრე ამავე მარკის ახალ ზეთში. ანალოგიურ მოვლენას ადგილი აქვს ელექტრომოწყობილობაში ახალი და რეგენირებული ზეთის ჩასხმისას.

რადგან სტანდარტის მიხედვით ზეთი საექსპლუატაციოდ გამოუსადეგარია, თუ მისი სისუფთავე მყარი ნაწილაკების მიხედვით XIII კლასს აღემატება (ცხრ. 4.1), რასაც ზემოთგანხილულის მიხედვით მაქსიმუმ 250000 ნაწილაკი შეესაბამება 100სმ^3 ზეთში, რომელთა გეომეტრიული ზომები 5–დან 15 მკმეტრამდე იცვლება.

ცხრილი 4.2 ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის ცვლილება მინარევების რაოდენობის მიხედვით

| № | Nytro 11GX | | | T-1500 ახალი | | | T-1500 რეგენირებული | | |
|----|---------------|--------|---------------|---------------|--------|---------------|---------------------|--------|---------------|
| | $N_{გამ. კვ}$ | N_2 | $U_{გამ. კვ}$ | $N_{გამ. კვ}$ | N_2 | $U_{გამ. კვ}$ | $N_{გამ. კვ}$ | N_2 | $U_{გამ. კვ}$ |
| 1. | 188706 | 8123 | 68 | 395420 | 31565 | 66 | 410390 | 32980 | 64 |
| 2. | 366664 | 26506 | 66 | 412320 | 35670 | 65 | 435720 | 36560 | 62 |
| 3. | 665054 | 186826 | 64 | 628410 | 109910 | 60 | 605220 | 82870 | 54 |
| 4. | 896110 | 263065 | 61 | 1069730 | 314560 | 53 | 1038890 | 278645 | 47 |
| 5. | 1155687 | 416578 | 58 | 1107650 | 335730 | 51 | 1010560 | 315725 | 42 |
| 6. | 1183413 | 563960 | 55 | 1201656 | 506640 | 50 | 1095110 | 485430 | 39 |
| 7. | 1297937 | 680900 | 52 | 1279716 | 619414 | 48 | 1216450 | 595440 | 37 |

განსხვავებით *Nytro* მარკის ზეთისგან $T-1500$ მარკის ახალ და რეგენირებულ ზეთებში გამრღვევი ძაბვის ინტენსიური შემცირება

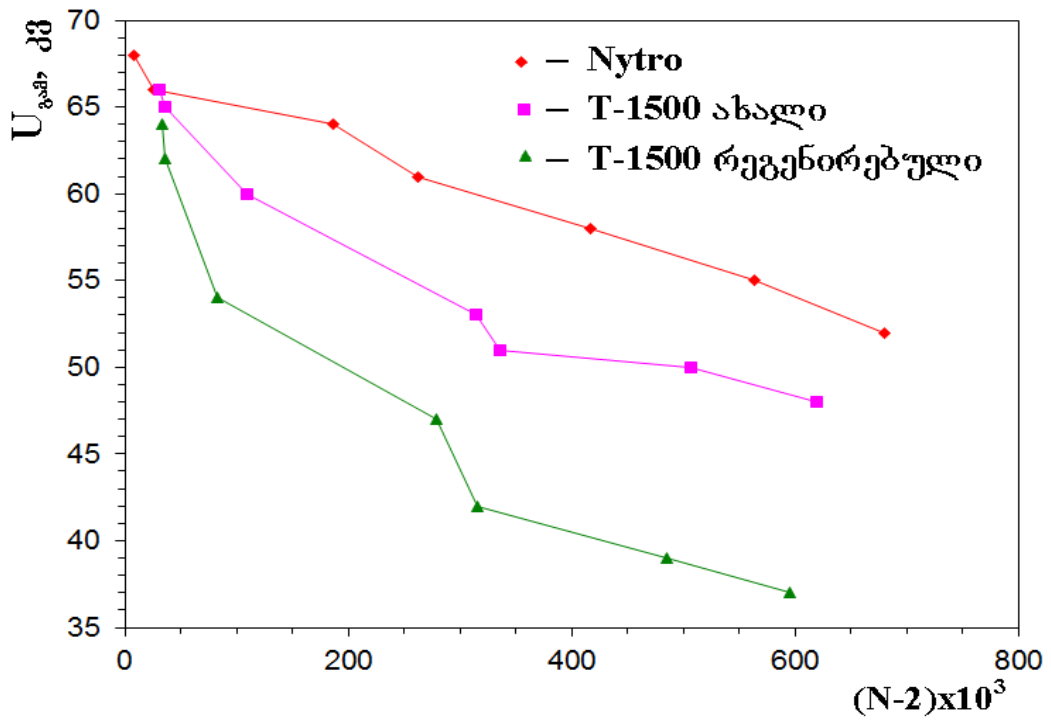
მინარევების 80000 ნაწილაკიდან იწყება, რაც ზეთის სისუფთავის XII კლასს შეესაბამება.

თუ ამ რაოდენობის მნარეული ნაწილაკებით შევაფასებთ საკვლევი ზეთის გამრღვევი ძაბვის ცვლილება აღმოჩნდება, რომ *Nytro* მარკის ზეთში გამრღვევი ძაბვის შემცირება 12% არ აღემატება, ხოლო *T-1500* მარკის ახალ და რეგენირებულ ზეთებისთვის შემცირება შესაბამისად 25% და 36% შეადგენს, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ მცირე ტენშემცველობის შემთხვევაში ახალი ზეთების გამრღვევი ძაბვის სიდიდე უფრო ნაკლებად არის დამოკიდებული ზეთის დაძველების პროდუქტების რაოდენობაზე, ვიდრე დაძველებული და შემდეგ რეგენირებული ზეთის.

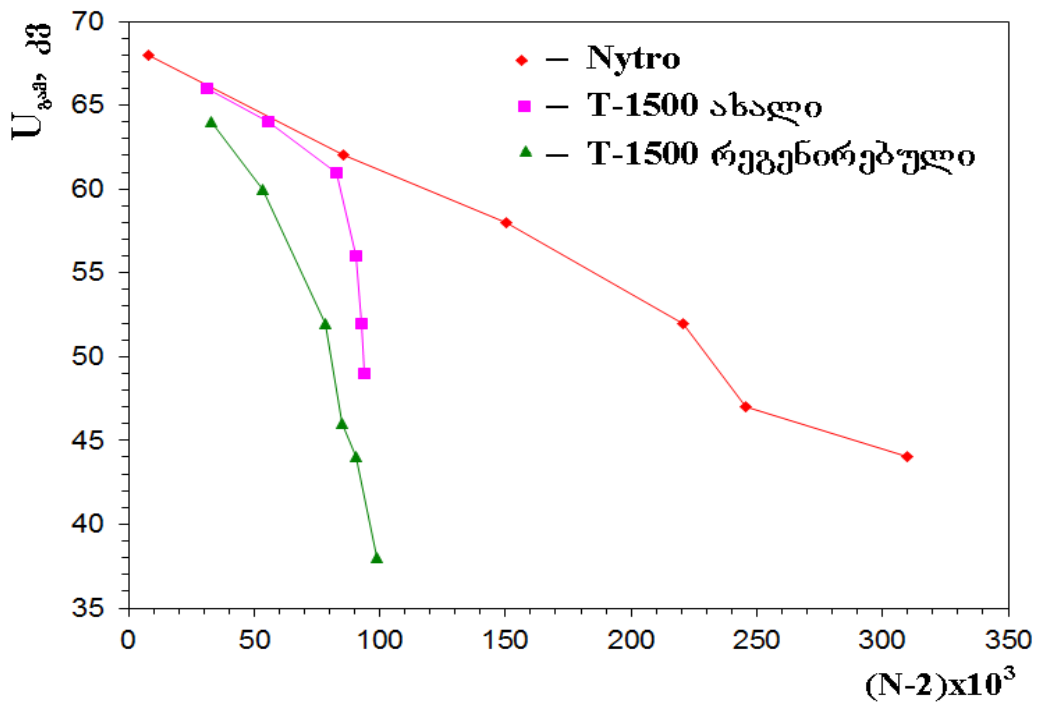
სხვადასხვა წარმოშობის მინარევების გავლენის შესაფასებლად ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდეზე ტრანსფორმატორის ზეთში ნახშირბადის ნაწილაკები (ელექტროტექნიკური გრაფიტის პუდრა) იხსნებოდა.

როგორც ცხრილი 4.3–დან ჩანს, ნახშირბადის მინარევები სამივე სახის ზეთის გამრღვევ ძაბვას ამცირებს, მაგრამ შემცირება ყველაზე საგრძნობლად *T-1500* მარკის რეგენირებულ ზეთშია გამოხატული.

როგორც გამრღვევი ძაბვის სიდიდის გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე დამოკიდებულებიდან ჩანს (ნახ. 4.4), *Nytro* მარკის ზეთში მსგავსად ზეთის დაძველების პროდუქტების ნაწილაკებისა, ამ შემთხვევაშიც ნაწილაკების რიცხვის გაზრდით გამრღვევი ძაბვის სიდიდეც სწორხაზოვნად მცირდება, მაგრამ იმავე სიდიდემდე შესამცირებლად, რაც ზეთის დაძველების პროდუქტების შემთხვევაში იყო, საჭიროა თითქმის ორჯერ ნაკლები რაოდენობის გრაფიტის ნაწილაკები, ხოლო *T-1500* მარკის ახალი და რეგენირებული ზეთებისთვის კი ექვსჯერ ნაკლები რაოდენობის გრაფიტის ნაწილაკები.



ნახ. 4.3 ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის დამოკიდებულება დაძველების პროდუქტების მყარი ნაწილაკების რაოდენობაზე



ნახ. 4.4 ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის დამოკიდებულება გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე

ცხრილი 4.3 გრაფიტის მინარევების გავლენა ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრულ მახასიათებლებზე

| | მინარევული | | U _{გ.ა.მ.} კვ | ტგბ % | | | | ρ 10 ¹⁰ ომი.მ | | | |
|------------------------------|-------------------|----------------|---------------------------|-------|-------|-------|------|--------------------------|------|------|------|
| | N _{ჯამი} | N ₂ | | 20°C | 50°C | 70°C | 90°C | 20°C | 50°C | 70°C | 90°C |
| Nytro 11GX | | | | | | | | | | | |
| 1. | 188706 | 8123 | 68 | 0,014 | 0,06 | 0,13 | 0,28 | 123,2 | 46,4 | 29,5 | 16,5 |
| 2. | 485810 | 85550 | 62 | 0,015 | 0,063 | 0,15 | 0,30 | 110 | 45 | 28 | 15 |
| 3. | 950765 | 150440 | 58 | 0,017 | 0,085 | 0,21 | 0,32 | 102 | 42 | 27 | 16 |
| 4. | 1427015 | 220650 | 52 | 0,079 | 0,12 | 0,33 | 0,38 | 89 | 40 | 28 | 15 |
| 5. | 1509880 | 245870 | 47 | 0,11 | 0,34 | 0,45 | 0,40 | 76 | 35 | 25 | 14 |
| 6. | 1595105 | 309730 | 44 | 0,12 | 0,36 | 0,4 | 0,42 | 70 | 30 | 21 | 12 |
| T – 1500 ახალი | | | | | | | | | | | |
| 1. | 395420 | 31565 | 66 | 0,022 | 0,091 | 0,12 | 0,34 | 110 | 49,2 | 28,5 | 17,0 |
| 2. | 415725 | 55778 | 64 | 0,024 | 0,079 | 0,18 | 0,36 | 102 | 47 | 26 | 14,0 |
| 3. | 520920 | 82960 | 61 | 0,03 | 0,089 | 0,28 | 0,41 | 71,1 | 35 | 21 | 14,0 |
| 4. | 1365760 | 90750 | 56 | 0,031 | 0,092 | 0,29 | 0,43 | 70 | 34 | 26 | 15 |
| 5. | 1366800 | 92620 | 52 | 0,03 | 0,091 | 0,3 | 0,44 | 71 | 33 | 25 | 14 |
| 6. | 1365235 | 94110 | 49 | 0,03 | 0,092 | 0,03 | 0,46 | 70 | 34 | 24 | 11 |
| T – 1500 რეგენირებული | | | | | | | | | | | |
| 1. | 410390 | 32980 | 64 | 0,042 | 0,102 | 0,137 | 0,4 | 67 | 29,5 | 15,4 | 5,8 |
| 2. | 410720 | 53210 | 60 | 0,063 | 0,12 | 0,21 | 0,48 | 60 | 26 | 14 | 6,0 |
| 3. | 501635 | 78110 | 52 | 0,089 | 0,15 | 0,31 | 0,55 | 45 | 21 | 12 | 4,5 |
| 4. | 820730 | 85125 | 46 | 0,13 | 0,3 | 0,46 | 0,81 | 32 | 16 | 9 | 3,0 |
| 5. | 835620 | 90710 | 44 | 0,12 | 0,31 | 0,48 | 1,0 | 30 | 15 | 10 | 2,5 |
| 6. | 918671 | 98640 | 38 | 0,18 | 0,36 | 0,57 | 1,2 | 24 | 9 | 4 | 1,0 |

T – 1500 მარკის ახალ და რეგენირებულ ზეთებისთვის შესაბამისად გრაფიტის ნაწილაკების 80000 და 60000 რაოდენობისას გამრღვევი ძაბვის შემცირება მნიშვნელოვანია. რაც მათში Nytro 11GX –თან შედარებით 4–ჯერ მეტი არომატული ნახშირწყალბადების არსებობით შეიძლება ავხსნათ,

რადგან არომატული ნახშირწყალბადების დიპოლური ჯგუფები ადვილად ამყარებენ კოვალენტურ კავშირს მინარევებთან [28].

შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ როგორც ზეთის დაძველების პროდუქტების, ასევე გრაფიტის ნაწილაკები ყველა სახის ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდეს ამცირებს, მაგრამ ეს შემცირება *Nytro* მარკის ზეთში უფრო ნაკლებად არის გამოხატული, ვიდრე *T-1500* მარკის ახალ ან რეგენირებულ ზეთებში.

T-1500 მარკის, როგორც ახალი, ისე რეგენირებული ზეთებისთვის, როდესაც მინარეული ნაწილაკების რაოდენობა 60000 აჭარბებს გამრღვევი ძაბვა მნიშვნელოვნად მცირდება, მაგრამ შემცირება უფრო ინტენსიურია გრაფიტის ნაწილაკების შემთხვევაში, ვიდრე ზეთის დაძველების პროდუქტებისას. სავარაუდოდ ეს გრაფიტის მაღალი ელექტროგამტარობით და კოვალენტური კავშირის ადვილად დამყარების უნარით აიხსნება.

ყველა სახის ზეთების გამრღვევი ძაბვის სიდიდეზე გრაფიტის ნაწილაკების გავლენა უფრო ძლიერად არის გამოხატული, ვიდრე ზეთის დაძველების პროდუქტების, მაგრამ *T-1500* მარკის ზეთებისთვის ეს გავლენა თითქმის სამჯერ უფრო ძლიერია, ვიდრე *Nytro* მარკის ზეთისთვის.

4.3 ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთების დიელექტრიკული დანაკარგების დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე

ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტების მინარევები მნიშვნელოვნად ზრდიან, როგორც ახალი ისე რეგენირებული ზეთების დიელექტრიკული დანაკარგების სიდიდეს, ამასთანავე, რაც მეტია ზეთის ტემპერატურა, მით მეტია ეს ცვლილება (ცხრ. 4.4), მაგრამ სტანდარტი ითხოვს, რომ ზეთის ხარისხი შეფასდეს დიელექტრიკული დანაკარგების იმ

მნიშვნელობით, რომლებიც განსაზღვრულია $90^{\circ}C$ ტემპერატურაზე – $tg\delta_{90}$, ხოლო ზეთის სისუფთავის შესაფასებლად ნაწილაკების N_2 რაოდენობა გამოიყენება.

ცხრილი 4.4 ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების ($tg\delta$, %) ცვლილება სხვადასხვა ტემპერატურაზე მინარევების რაოდენობის მიხედვით

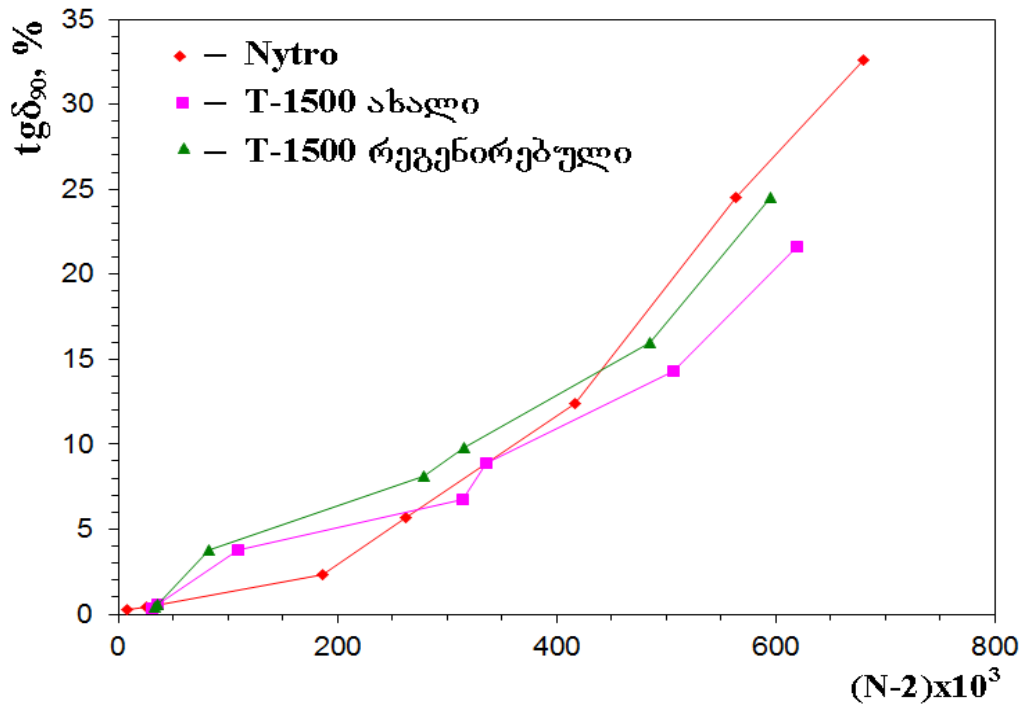
| № | $N_{ჯამი}$ | N_2 | 20°C | 50°C | 70°C | 90°C |
|----------------------------|------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Nytro 11GX | | | | | | |
| 1. | 188706 | 8123 | 0,014 | 0,06 | 0,13 | 0,28 |
| 2. | 366664 | 26506 | 0,019 | 0,09 | 0,19 | 0,42 |
| 3. | 665054 | 186826 | 0,163 | 0,66 | 1,27 | 2,33 |
| 4. | 896110 | 263065 | 0,45 | 1,53 | 3,17 | 5,67 |
| 5. | 1155687 | 416578 | 0,91 | 3,85 | 7,0 | 12,4 |
| 6. | 1183413 | 563960 | 1,9 | 7,7 | 14,1 | 24,5 |
| 7. | 1297937 | 680900 | 2,77 | 10,7 | 18,8 | 32,6 |
| T-1500 ახალი | | | | | | |
| 1. | 395420 | 31565 | 0,03 | 0,091 | 0,12 | 0,35 |
| 2. | 412320 | 35670 | 0,04 | 0,12 | 0,29 | 0,55 |
| 3. | 628410 | 109910 | 0,37 | 1,44 | 2,28 | 3,79 |
| 4. | 1069730 | 314560 | 0,63 | 2,41 | 4,05 | 6,78 |
| 5. | 1107650 | 335730 | 0,77 | 3,08 | 5,24 | 8,86 |
| 6. | 1201656 | 506640 | 1,28 | 5,01 | 8,48 | 14,27 |
| 7. | 1279716 | 619414 | 1,81 | 7,24 | 12,7 | 21,63 |
| T-1500 რეგენირებული | | | | | | |
| 1. | 410390 | 32980 | 0,042 | 0,102 | 0,137 | 0,4 |
| 2. | 435720 | 36560 | 0,051 | 0,13 | 0,2 | 0,6 |
| 3. | 605220 | 82870 | 0,33 | 0,82 | 1,29 | 3,8 |
| 4. | 1038890 | 278645 | 0,72 | 1,24 | 2,73 | 8,1 |
| 5. | 1010560 | 315725 | 0,89 | 1,81 | 2,74 | 9,8 |
| 6. | 1095110 | 485430 | 1,4 | 2,14 | 5,49 | 16,0 |
| 7. | 1216450 | 595440 | 2,3 | 4,24 | 8,17 | 24,5 |

დიელექტრიკული დანაკარგების ($tg\delta_{90}$) დამოკიდებულებას მინარევების რაოდენობაზე სამივე სახის ზეთებისთვის ზოგადად ექსპონენციალური სახე აქვს (ნახ. 4.5) და თუ ნაწილაკების რიცხვი 300000–ზე ნაკლებია, ე.ი. მცირედ აღემატება სისუფთავის XIII კლასის ზედა ზღვარს, მაშინ *Nytro* მარკის ზეთს უფრო ნაკლები დიელექტრიკული დანაკარგები აქვს, ვიდრე $T-1500$ მარკის ახალ ან რეგენირებულ ზეთებს. ამასთანავე 300000 ნაწილაკებისთვის დიელექტრიკული დანაკარგების ზრდა საწყისთან შედარებით *Nytro* მარკის ზეთისთვის 20, ხოლო $T-1500$ მარკის ახალი ან რეგენირებული ზეთებისთვის თითქმის ტოლია და 25 არ აღემატება.

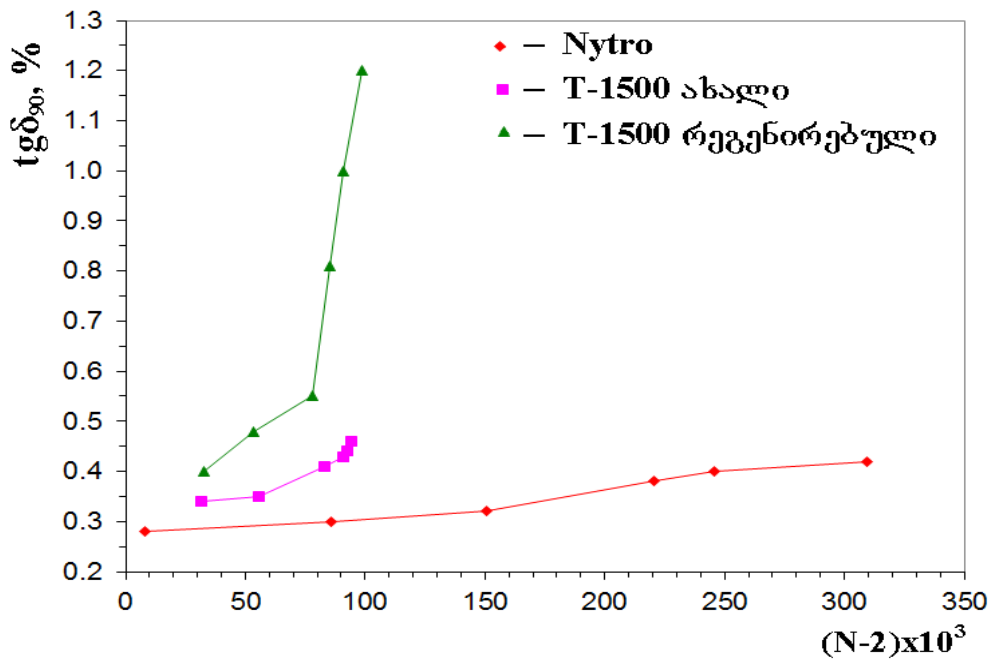
როდესაც მინარევების რაოდენობა სისუფთავის კლასის ზღვარს აღემატე, მაშინ დიელექტრიკული დანაკარგების სიდიდე *Nytro* მარკის ზეთისთვის უფრო მეტია, ვიდრე $T-1500$ მარკის ახალი ან რეგენირებული ზეთებისთვის, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ *Nytro* მარკის ზეთი დაძველების პროდუქტების გავლენის მიმართ სისუფთავის საექსპლუატაციო ზღვრამდე უფრო სტაბილურია, ვიდრე $T-1500$ მარკის ახალი ან რეგენირებული ზეთები, ხოლო ზღვარს ზემოთ კი $T-1500$ მარკის ზეთი.

როგორც ცხრილი 4.3 და 4.4 მონაცემების შედარებიდან ჩანს, ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების სიდიდეზე დაძველების ნაწილაკები უფრო მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს, ვიდრე გრაფიტის ნაწილაკები.

სამივე სახის ზეთებისთვის $tg\delta_{90}$ გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე დამოკიდებულებიდან (ნახ. 4.6) ჩანს, *Nytro 11GX* მარკის ზეთისთვის დიელექტრიკული დანაკარგები ნაწილაკების რიცხვის გაზრდით უმნიშვნელოდ, მაგრამ სწორხაზოვნად იზრდება, ხოლო $T-1500$ მარკის ახალი ან რეგენირებული ზეთების – ექსპონენციალურად იმატებს, მაგრამ რეგენირებული $T-1500$ მარკის ზეთისთვის ზრდა უფრო მნიშვნელოვანია, ვიდრე ახალი $T-1500$ მარკის ზეთისთვის.



ნახ. 4.5 90° C ტემპურატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების დამოკიდებულება ზეთის დაძველების პროდუქტების მყარი ნაწილაკების რაოდენობაზე



ნახ. 4.6 90° C ტემპურატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების დამოკიდებულება გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე

შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ზეთის დაძველების პროდუქტები უფრო მეტ გავლენას ახდენს ყველა მარკის ზეთის დიელექტრიკულ დანაკარგებზე, ვიდრე ნახშირის ნაწილაკები. ამასთანავე, გავლენა $T-1500$ მარკის ზეთებისთვის უფრო ძლიერია, ვიდრე *Nytro* მარკის ზეთისთვის.

თუ მინარევების რაოდენობა ტრანსფორმატორის ზეთში სისუფთავის XIII კლასის ზედა ზღვარს არ აღემატება, მაშინ ნებისმიერი სახის მინარევების მიმართ *Nytro 11GX* მარკის ზეთი უფრო სტაბილურია, ვიდრე $T-1500$ მარკის ახალი ან რეგენირებული ზეთები, რაც სავარაუდოდ ამ უკანასკნელში არომატული ნახშირწყალბადების მცირე შემცველობით აიხსნება.

4.4 ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთების კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე

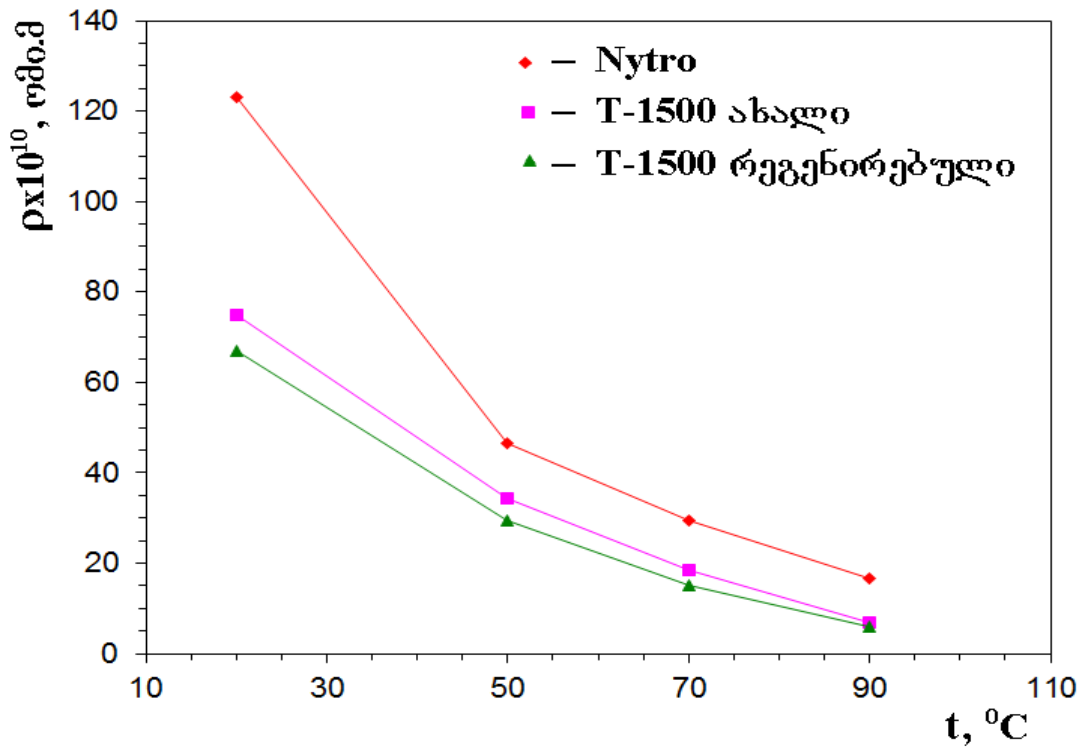
ცნობილია, რომ ნებისმიერ ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის სიდიდეს არა მარტო მინარევების რაოდენობა, არამედ მათი სახე განაპირობებს. უაღრესად სუფთა ტრანსფორმატორის ზეთში ადგილი აქვს ელექტრონულ ელექტროგამტარობას, რომლის სიდიდე სუსტად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე და ნაწილაკების რიცხვის გაზრდით პროპორციულად იზრდება, ე.ი. კუთრი წინაღობა პროპორციულად მცირდება.

თუ ტრანსფორმატორის ზეთში მინარეული იონებით გამოწვეულ ელექტროგამტარობას აქვს ადგილი, მაშინ კუთრი წინაღობა მინარევების რაოდენობის ან ტემპერატურის გაზრდით ექსპონენციალურად მცირდება. ცნობილია, რომ ტემპერატურის $70^{\circ}C$ –ით გაზრდისას კუთრი წინაღობა 10–12–ჯერ მცირდება. დენის გადამტანების ტიპის შეცვლით აღნიშნული კანონზომიერება ირღვევა, მაგალითად, მოლიონური ელექტროგამტარობის შემთხვევაში კუთრი წინაღობა 5–6–ჯერ მცირდება [29].

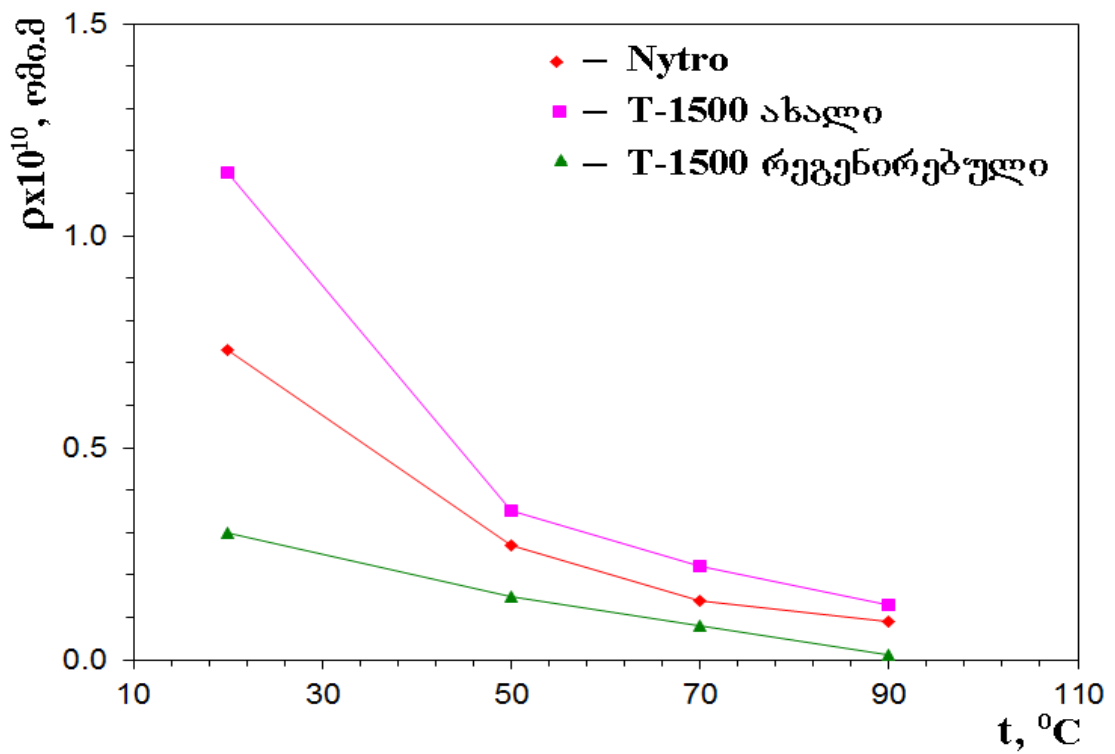
ცხრილი 4.5 ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის
(ρ , 10^{10} ომი.მ) დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე

| N ^o | N _{ჯამი} | N ₂ | 20°C | 50°C | 70°C | 90°C |
|------------------------------|-------------------|----------------|-------|------|------|------|
| Nytro 11GX | | | | | | |
| 1. | 188706 | 8123 | 123,2 | 46,4 | 29,5 | 16,5 |
| 2. | 366664 | 26506 | 120 | 39,6 | 21,2 | 9,2 |
| 3. | 665054 | 186826 | 14,2 | 5,0 | 3,0 | 1,8 |
| 4. | 896110 | 263065 | 7,2 | 1,7 | 1,3 | 0,65 |
| 5. | 1155687 | 416578 | 2,4 | 0,75 | 0,44 | 0,28 |
| 6. | 1183413 | 563960 | 1,1 | 0,32 | 0,19 | 0,11 |
| 7. | 1297937 | 680900 | 0,73 | 0,27 | 0,14 | 0,09 |
| T – 1500 ახალი | | | | | | |
| 1. | 395420 | 31565 | 75,0 | 34,2 | 18,5 | 7,0 |
| 2. | 412320 | 35670 | 71,1 | 20,1 | 11,9 | 6,7 |
| 3. | 628410 | 109910 | 39,7 | 13,2 | 4,5 | 3,0 |
| 4. | 1069730 | 314560 | 3,51 | 1,21 | 0,85 | 0,56 |
| 5. | 1107650 | 335730 | 2,81 | 0,9 | 0,64 | 0,14 |
| 6. | 1201656 | 506640 | 1,64 | 0,51 | 0,36 | 0,22 |
| 7. | 1279716 | 619414 | 1,15 | 0,35 | 0,22 | 0,13 |
| T – 1500 რეგენირებული | | | | | | |
| 1. | 410390 | 32980 | 67 | 29,5 | 15,4 | 5,8 |
| 2. | 435720 | 36560 | 48 | 13,6 | 7,5 | 4,2 |
| 3. | 605220 | 82870 | 29 | 9,8 | 3,6 | 2,9 |
| 4. | 1038890 | 278645 | 2,6 | 0,9 | 0,6 | 0,4 |
| 5. | 1010560 | 315725 | 1,3 | 0,45 | 0,25 | 0,15 |
| 6. | 1095110 | 485430 | 0,9 | 0,3 | 0,1 | 0,02 |
| 7. | 1216450 | 595440 | 0,3 | 0,15 | 0,08 | 0,01 |

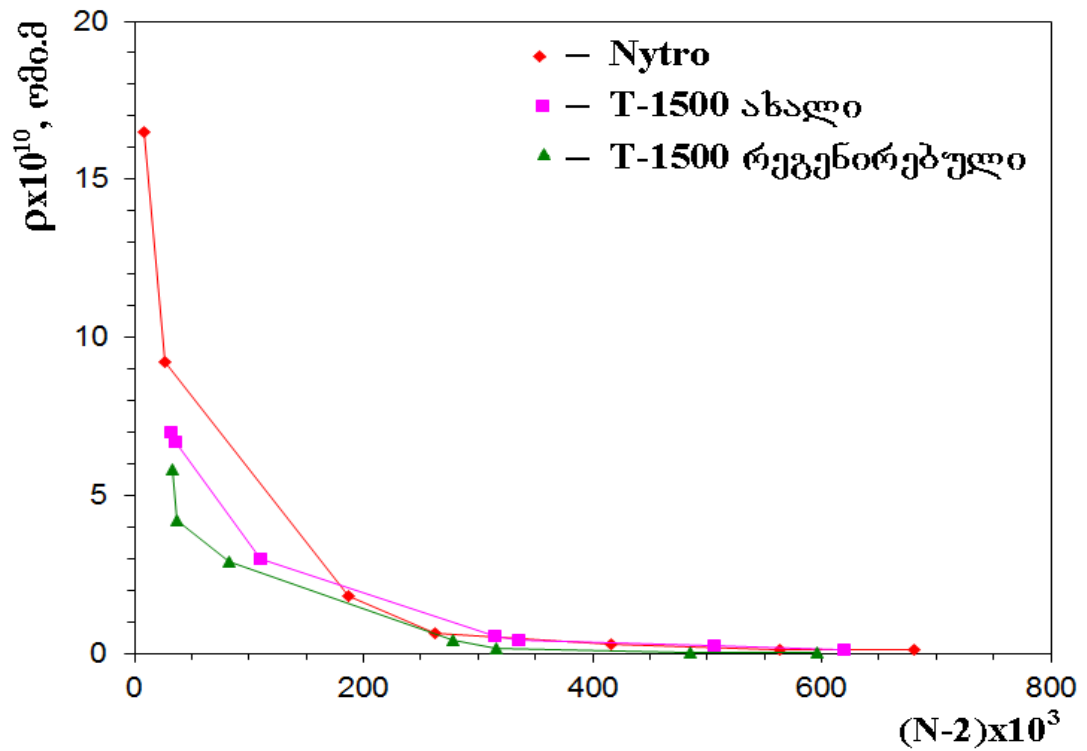
ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტების გავლენის შესასწავლად ახალი და რეგენირებული ზეთის კუთრი წინაღობის სიდიდეზე პირველ რიგში განსასაზღვრავი იყო თუ, როგორი სახის გამტარებლობას ჰქონდა ადგილი ტრანსფორმატორის ზეთში მინარევების გახსნამდე და გახსნის შემდეგ.



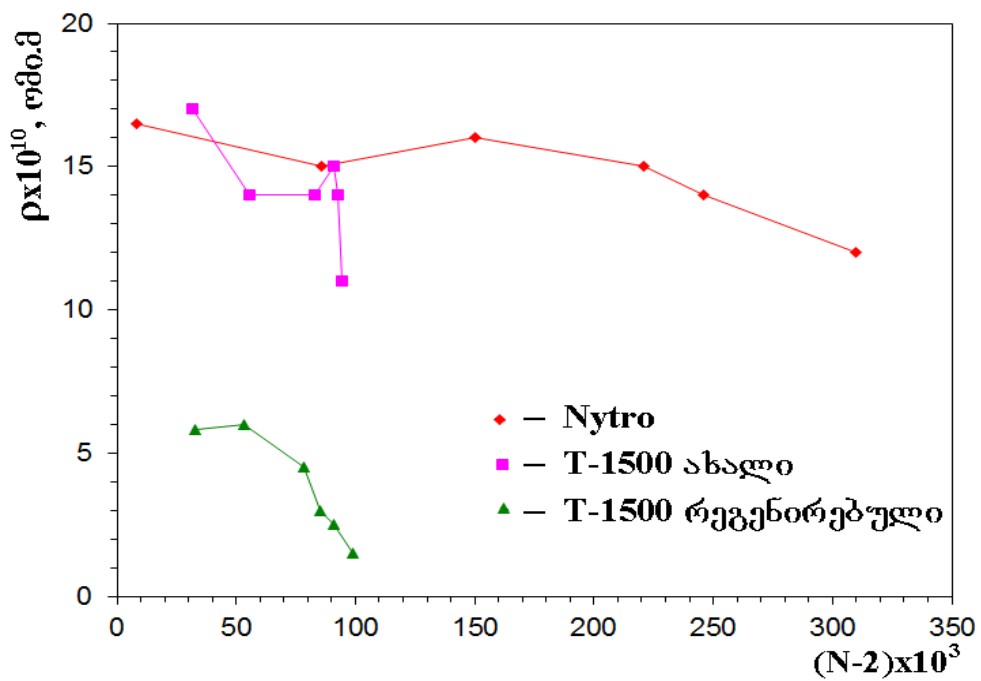
ნახ. 4.7 ტრანსფორმატორის ზეთების კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე მინარევების გახსნამდე



ნახ. 4.8 ტრანსფორმატორის ზეთების კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე მინარევების მაქსიმალური გახსნის შემდეგ



ნახ. 4.9 90° C ტემპურატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ზეთის დაძველების პროდუქტების მყარი ნაწილაკების რაოდენობაზე



ნახ. 4.10 90° C ტემპურატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე

ამ მიზნით ცდის შედეგების მონაცემებით (ცხრ. 4.5) აგებული იყო კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე ზეთში მინარევების გახსნამდე და მაქსიმალური გახსნის შემდეგ. ამასთან ერთად შეფასდა კუთრი წინაღობის შემცირების კოეფიციენტი ტემპერატურის $70^{\circ}C$ –ით გაზრდისას.

ამ დამოკიდებულების გრაფიკები (ნახ. 4.7, 4.8) გვიჩვენებენ, რომ ტემპერატურის $70^{\circ}C$ –ით გაზრდით, როგორც საწყის მდგომარეობაში, ასევე მინარევების მაქსიმალური გახსნისას ტრანსფორმატორის სამივე სახის ზეთის კუთრი წინაღობა 10–12–ჯერ მცირდება და კუთრი წინაღობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებას მკვეთრად გამოხატული ექსპონენციალური სახე აქვს, რაც იმის დამამტკიცებელია, რომ ტრანსფორმატორის სამივე სახის ზეთში დამველების პროდუქტების გახსნა ელექტროგამტარობის სახეს არ ცვლის.

$90^{\circ}C$ ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის (ρ_{90}) დამოკიდებულების მრუდს ზეთის დამველების ნაწილაკების რაოდენობაზე სამივე სახის ზეთისთვის ექსპონენციალური სახე აქვს (ნახ. 4.9) და ზეთის სისუფთავის XIII კლასის საზღვრამდეა (250000 ნაწილაკი) *Nytro 11GX* მარკის ზეთს კუთრი წინაღობის უფრო მეტი მნიშვნელობა გააჩნია, ვიდრე სხვა ზეთებს, მაგრამ ნაწილაკების რიცხვის გაზრდით კუთრი წინაღობის სიდიდე მნიშვნელოვნად მცირდება და სისუფთავის ზედა ზღვარზე (250000 ნაწილაკი 100სმ^3 ზეთში) სამივე სახის ზეთს კუთრი წინაღობის ტოლი მნიშვნელობა აქვს. ასეთივე კანონზომიერებას ადგილი აქვს 20, 50 და $70^{\circ}C$ ტემპერატურაზე.

გრაფიტის ნაწილაკების გახსნა (ნახ. 4.10) სამივე სახის ზეთში ნიშნელოვნად ცვლის აღნიშნული დამოკიდებულების სახეს და ახალი ზეთებისთვის დამოკიდებულების მრუდზე მკვეთრად გამოხატული მაქსიმუმი შეიმჩნევა, რაც სავარაუდოდ გრაფიტის ნაწილაკებით, გამტარებლობის იონური ნაწილაკების ბლოკირებით არის გამოწვეული.

ტრანსფორმატორის ზეთში გახსნილი გრაფიტის ნაწილაკები სავარაუდოდ კოლოიდურ მდგომარეობაში იმყოფებიან და იონურ გამტარებლობასთან ერთად კოლოიდური ნაწილაკებით განპირობებულ გამტარებლობას წარმოქმნის. თუ გამრღვევი ძაბვის და დიელექტრიკული დანაკარგების სიდიდეზე ნახშირის ნაწილაკების გავლენა გარკვეულ კანონზომიერებას ექვემდებარება კუთრი წინალობის შემთხვევაში კანონზომიერების დადგენა შეუძლებელია.

4.5 ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთების ზედაპირული დაჭიმულობის და რეფრაქციის კოეფიციენტის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე

ტრანსფორმატორის ზეთის დამკველების პროდუქტები ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებებს შეიცავენ. ამის გამო, ახალ ზეთში მათი გახსნით ზედაპირული დაჭიმულობის და რეფრაქციის კოეფიციენტის ცვლილებაა მოსალოდნელი.

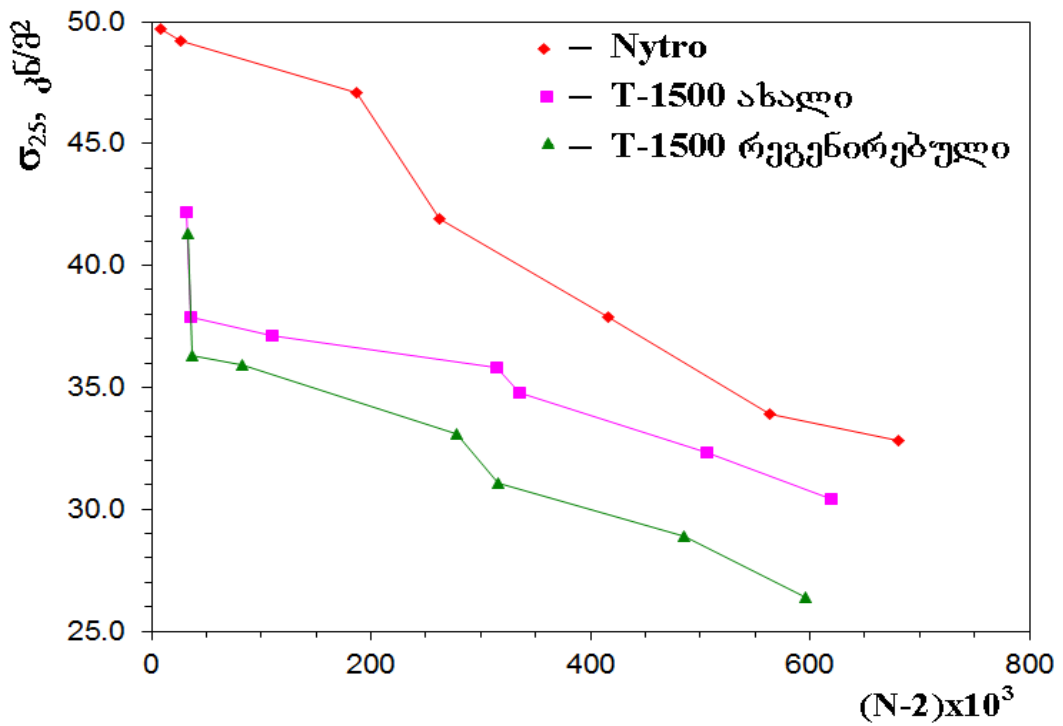
ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების რაოდენობის გაზრდა ტრანსფორმატორის ახალ ან რეგენირებულ ზეთში ზედაპირული დაჭიმულობის შემცირებას იწვევს (ცხრ. 4.6). ამასთანავე, უმნიშვნელოდ იზრდება რეფრაქციის კოეფიციენტი, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ტრანსფორმატორის ზეთის დამკველების პროდუქტები არა მარტო ზეთის ელექტრული მახასიათებლების, არამედ ფიზიკური მახასიათებლების მნიშვნელოვან გაუარესებას იწვევს.

Nytro 11GX მარკის ახალი ზეთისთვის ზედაპირული დაჭიმულობის დამოკიდებულებას მინარევების რაოდენობაზე სწორხაზოვანი სახე აქვს (ნახ. 4.11), ხოლო *T – 1500* მარკის ახალი და რეგენირებული ზეთებისთვის შეიმჩნევა სწორხაზოვანი დამოკიდებულებიდან გადახრა, რაც შესაძლებელია *T – 1500* მარკის ზეთის თვისებით იყოს გამოწვეული.

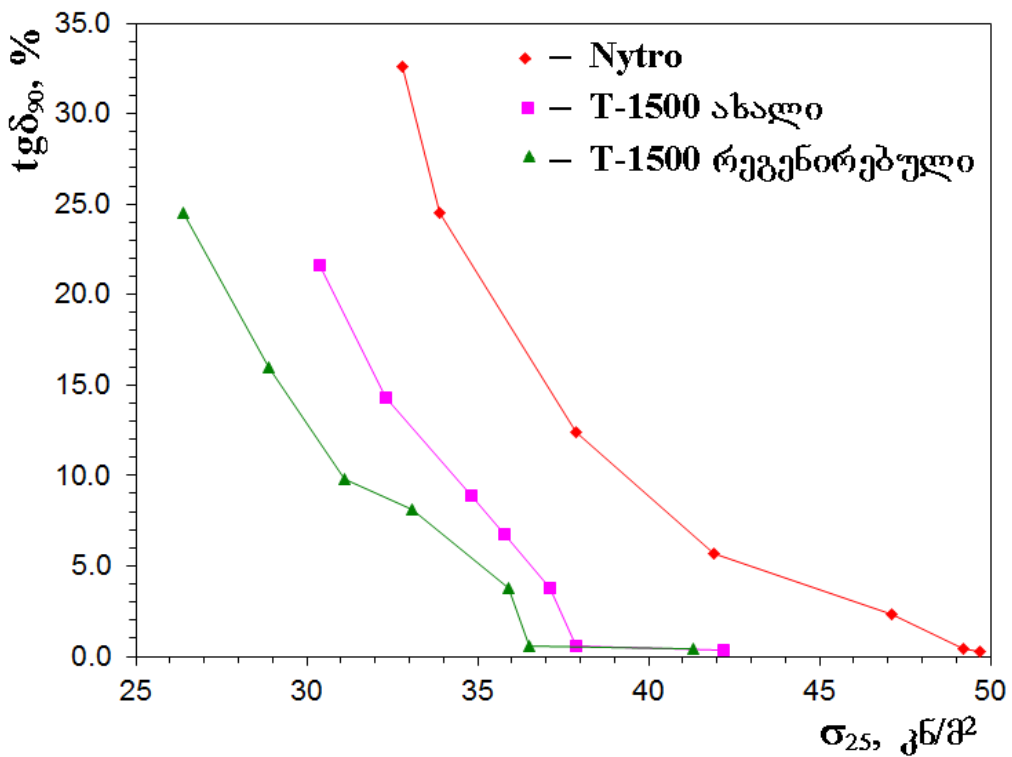
ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავის XIII კლასის ზედა ზღვარს შესაბამისი 250000 ნაწილაკისთვის სამივე სახის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა საექსპლუატაციო ნორმის ზღვარს 32 კნ/მ აღემატება.

ცხრილი 4.6 ტრანსფორმატორის ზეთის რეფრაქციის კოეფიციენტის და ზედაპირული დაჭიმულობის (σ) ცვლილება მინარევების რაოდენობის მიხედვით

| № | $N_{\text{ჯამი}}$ | N_2 | $\sigma, t = 25^{\circ} C$ კნ/მ | n $t = 20$ | $tg \delta_{90}$ % |
|----------------------------|-------------------|--------|------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Nytro 11GX | | | | | |
| 1. | 188706 | 8123 | 49,7 | 1,4748 | 0,28 |
| 2. | 366664 | 26506 | 49,2 | 1,4749 | 0,42 |
| 3. | 665054 | 186826 | 47,1 | 1,4756 | 2,33 |
| 4. | 896110 | 263065 | 41,9 | 1,4759 | 5,67 |
| 5. | 1155687 | 416578 | 37,9 | 1,4763 | 12,4 |
| 6. | 1183413 | 563960 | 33,9 | 1,4765 | 24,5 |
| 7. | 1297937 | 680900 | 32,8 | 1,4766 | 32,6 |
| T-1500 ახალი | | | | | |
| 1. | 395420 | 31565 | 42,2 | 1,4738 | 0,35 |
| 2. | 412320 | 35670 | 37,9 | 1,4741 | 0,55 |
| 3. | 628410 | 109910 | 37,1 | 1,4748 | 3,79 |
| 4. | 1069730 | 314560 | 35,8 | 1,4752 | 6,78 |
| 5. | 1107650 | 335730 | 34,8 | 1,4755 | 8,86 |
| 6. | 1201656 | 506640 | 32,3 | 1,4759 | 14,27 |
| 7. | 1279716 | 619414 | 30,4 | 1,4770 | 21,68 |
| T-1500 რეგენირებული | | | | | |
| 1. | 410390 | 32980 | 41,3 | 1,4751 | 0,4 |
| 2. | 435720 | 36560 | 36,5 | 1,4756 | 0,6 |
| 3. | 605220 | 82870 | 35,9 | 1,4760 | 3,8 |
| 4. | 1038890 | 278645 | 33,1 | 1,4764 | 8,1 |
| 5. | 1010560 | 315725 | 31,1 | 1,4767 | 9,8 |
| 6. | 1095110 | 485430 | 28,9 | 1,4772 | 16,0 |
| 7. | 1216450 | 595440 | 26,4 | 1,4778 | 2,45 |



ნახ. 4.11 ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე



ნახ. 4.12 ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების $tg\delta_{90}$ დამოკიდებულება ზედაპირულ დაჭიმულობაზე

ცნობილია, რომ ტრანსფორმატორის ზეთის დამველებით ზეთის რეფრაქციის კოეფიციენტი იზრდება. ჩვენს მიერ გამოკვლეულ სამივე სახის ზეთებისთვის მინარევების რაოდენობის გაზრდით რეფრაქციის კოეფიციენტი უმნიშვნელოდ იზრდება (ცხრ. 4.6) და მატება 2% არ აღემატება, ე.ი. მინარევები რეფრაქციის კოეფიციენტზე სგრძნობ გავლენას ვერ ახდენენ. ეს იმას ნიშნავს, რომ ზეთის დამველების პროდუქტების გახსნით ზეთის სტრუქტურა არ იცვლება.

რადგან დიელექტრიკული დანაკარგები და ზედაპირული დაჭიმულობა ცალ-ცალკეა დამოკიდებული მინარევების რაოდენობასთან, მაშინ შეგვიძლია დავადგინოთ დამოკიდებულება ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირულ დაჭიმულობასა და დიელექტრიკულ დანაკარგებს შორის, როდესაც ტრანსფორმატორის ზეთის ტენშემცველობა, მჟავური რიცხვი, წყალში ხსნადი მჟავების და ტუტეების რაოდენობა და სტრუქტურულ ჯგუფური შემადგენლობა უცვლელია. ამ დამოკიდებულებას ექსპონენციალური დამოკიდებულების სახე აქვს და ზედაპირული დაჭიმულობის შემცირებით დიელექტრიკული დანაკარგები სამივე სახის ზეთისთვის თითქმის სწორხაზოვნად იზრდება (ნახ. 4.12).

დასკვნა თავი 4-ის მიმართ

1. ზეთის დამველების პროდუქტების ნაწილაკების რიცხვის ზრდა სამივე სახის ზეთში გამრღვევი ძაბვის სწორხაზოვან შემცირებას იწვევს. მაღალი გამტარობის ნახშირის ნაწილაკების გახსნა *Nytro 11GX* მარკის ზეთში სწორხაზოვან დამოკიდებულებას ვერ ცვლის, ხოლო *T – 1500* მარკის ახალი ან რეგენირებული ზეთისთვის სისუფთავის დასაშვები ზღვარის მიღწევასას გამრღვევი ძაბვა სწრაფად მცირდება, მაგრამ მინარევების ნებისმიერი კონცენტრაციისას *Nytro 11GX* მარკის ზეთს უფრო დიდი გამრღვევი ძაბვა ახასიათებს, ვიდრე *T – 1500* მარკის ახალ ან რეგენირებულ ზეთებს.

2. სამივე სახის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების მნიშვნელობა $90^{\circ}C$ ტემპერატურაზე მინარევების რაოდენობის მიხედვით სწორხაზოვნად იზრდება, მაგრამ ზეთის დაძველების პროდუქტები 10–ჯერ უფრო მეტად ზრდიან დიელექტრიკული დანაკარგების სიდიდეს, ვიდრე იმავე რაოდენობის მაღალი გამტარობის გრაფიტის მინარევები. ამასთანავე, სისუფთავის XIII კლასის ზღვრამდე *Nytro 11GX* მარკის ზეთს უფრო ნაკლები დიელექტრიკული დანაკარგები გააჩნია, ვიდრე *T – 1500* მარკის ზეთებს.
3. ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტები სამივე სახის ზეთში იონურ ელექტროგამტარებლობას ქმნიან, ხოლო გრაფიტის ნაწილაკები კი კოლოიდურს, ამის გამო დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდით ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობა ექსპონენციალურად მცირდება, ხოლო გრაფიტის რაოდენობის გაზრდა კი შედარებით ნაკლებად ამცირებს კუთრ წინაღობას და დამოკიდებულების მრუდის ექსპონენციალური კანონი ირღვევა.
4. დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდით სამივე სახის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა თითქმის სწორხაზოვნად მცირდება და მინარევების ნებისმიერი რაოდენობისას *Nytro 11GX* მარკის ზეთს უფრო მეტი ზედაპირული დაჭიმულობა აქვს, ვიდრე *T – 1500* მარკის ზეთს.
5. თუ ტრანსფორმატორის ზეთის ტენშემცველობა და მჟავური რიცხვი არ იცვლება, მაშინ მინარევების რაოდენობის გაზრდით გამოწვეული ზედაპირული დაჭიმულობის შემცირება უკუპროპორციულ დამოკიდებულებაშია ამავე ფაქტორით გამოწვეული დიელექტრიკული დანაკარგების ზრდასთან.

დასკვნა

ზემოთ განხილული ექსპერიმენტალური მონაცემების ანალიზით შეგვიძლია დავასკვნათ:

1. რემონტის შემდეგ მყარი იზოლაციის მოცულობაში და აქტიური ნაწილის ზედაპირზე ყოველთვის რჩება ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტები. ექსპლუატაციის განმავლობაში ისინი ზეთში იხსნებიან და ახალი ზეთის თვისებების გაუარესებას იწვევენ;

2. ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტების გახსნა ახალ ან რეგენირებულ ზეთში არა მარტო ამ ზეთის ელექტრული მახასიათებლების ცვლილებას იწვევს, არამედ ფიზიკურ პარამეტრებზეც ახდენს გავლენას. ეს ცვლილება უფრო მნიშვნელოვანია, ვიდრე ასეთივე ზეთებში მაღალი გამტარებლობის მქონე გრაფიტის ნაწილაკების გახსნა;

3. ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტებს ნაწილაკების რიცხვის ზრდა სამივე სახის ზეთში გამრღვევი ძაბვის სწორხაზოვან შემცირებას იწვევს. მაღალი გამტარობის ნახშირის ნაწილაკების გახსნა *Nytro 11GX* მარკის ზეთში სწორხაზოვან დამოკიდებულებას ვერ ცვლის, ხოლო *T-1500* მარკის ახალი ან რეგენირებული ზეთისთვის სისუფთავის დასაშვები ზღვარის მიღწევასას გამრღვევი ძაბვა სწრაფად მცირდება, მაგრამ მინარევების ნებისმიერი კონცენტრაციისას *Nytro 11GX* მარკის ზეთს უფრო დიდი გამრღვევი ძაბვა ახასიათებს, ვიდრე *T-1500* მარკის ახალ ან რეგენირებულ ზეთებს.

4. სამივე სახის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების მნიშვნელობა $90^{\circ}C$ ტემპერატურაზე მინარევების რაოდენობის მიხედვით სწორხაზოვნად იზრდება, მაგრამ ზეთის დაძველების პროდუქტები 10-ჯერ უფრო მეტად ზრდიან დიელექტრიკული დანაკარგების სიდიდეს, ვიდრე იმავე რაოდენობის მაღალი გამტარობის გრაფიტის მინარევები. ამასთანავე, სისუფთავის XIII კლასის ზღვრამდე *Nytro 11GX* მარკის ზეთს უფრო

ნაკლები დიელექტრიკული დანაკარგები გააჩნია, ვიდრე $T-1500$ მარკის ზეთებს;

5. ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტები სამივე სახის ზეთში იონურ ელექტროგამტარებლობას ქმნიან, ხოლო გრაფიტის ნაწილაკები კი კოლოიდურს, ამის გამო დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდით ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობა ექსპონენციალურად მცირდება, ხოლო გრაფიტის რაოდენობის გაზრდა კი შედარებით ნაკლებად ამცირებს კუთრ წინაღობას და დამოკიდებულების მრუდის ექსპონენციალური კანონი ირღვევა;

6. დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდით სამივე სახის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა თითქმის სწორხაზოვნად მცირდება და მინარევების ნებისმიერი რაოდენობისას *Nytro 11GX* მარკის ზეთს უფრო მეტი ზედაპირული დაჭიმულობა აქვს, ვიდრე $T-1500$ მარკის ზეთს.

7. თუ ტრანსფორმატორის ზეთის ტენშემცველობა და მჟავური რიცხვი მცირე სიდიდისაა და არ იცვლება, მაშინ მინარევების რაოდენობის გაზრდით გამოწვეული ზედაპირული დაჭიმულობის შემცირება უკუპროპორციულ დამოკიდებულებაშია ამავე ფაქტორით გამოწვეული დიელექტრიკული დანაკარგების ზრდასთან;

8. ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველებით წარმოქმნილი მინარევები სამივე სახის ზეთის ელექტრული და ფიზიკური მახასიათებლების გაუარესებას იწვევს, მაგრამ *Nytro 11GX* მარკის ზეთი უფრო სტაბილურია მინარევების მიმართ, ვიდრე $T-1500$ მარკის ახალი ან რეგენირებული ზეთები.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. Москва, „Энергия“, 1964, 320 с.
2. Брай И.В. Регенерация трансформаторных масел. Москва, „Химия“, 1972, 165 с.
3. ჩიხლაძე რ., ნაცვლიშვილი კ. ელექტროტექნიკური მასალები. თბილისი, „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2007, 288 გვ.
4. Рыбак Б.М. Анализ нефти и нефтепродуктов. Москва, „Химия“, 1962, 882 с.
5. ГОСТ 26098-84, Нефтепродукты, термины и определения. Москва, „Изд. стандартов“, 1984, 12 с.
6. ГОСТ 3900-85, Нефть и нефтепродукты, методы определение плотности. Москва, „Изд. стандартов“, 1991, 37 с.
7. ГОСТ 20284-74, Нефтепродукты, методы определение цвета на колориметре ЦНТ. Москва, „Изд. стандартов“, 2000, 9 с.
8. ГОСТ 33-2000, Нефтепродукты: определение кинематической вязкости и расчёт динамической вязкости. Минск, „Метрология“, 19 с.
9. ГОСТ 2719-2008, Нефтепродукты, методы определения температуры вспышки в закрытом тигле пенски-мартенса. Москва, „Стандартинфо“, 2008, 26 с.
10. РД 34.43.205-95 Масла нефтяные трансформаторные. Экспресс-метод определения поверхностного напряжения масел на границе с водой. Москва „ЕЭС России“, 2005, 5 с.
11. ГОСТ 6581-75, Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. Москва, „Изд. стандартов“, 2002, 25 с.
12. Крейн С.Э., Кулакова Р.В. Нефтяные изоляционные масла. Москва, „Химия“, 2001, 143 с.
13. Вайда Д. Исследования повреждений изоляций. Москва, „Энергия“, 1968, 394с.
14. Кока И.А. Пробой жидких электроизоляционных материалов. Москва, „Энергия“, 1967, 80 с.

15. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. Москва „Издательство НЦ ЭНАС“, 2002, 211 с.
16. Динамика увлажнения изоляций в трансформаторе. Electrical World. №6, 1007, 72-80 p.
17. ГОСТ 982-80, Масла трансформаторные, технические условия. Москва, „Изд. стандартов“ 1989, 7 с.
18. ГОСТ 24874, Бумага электроизоляционная трансформаторная. Технические условия.
19. რ. ჩიხლაძე, კ. ნაცვლიძე, ივ. საჩაღელი, ლ. აქოქიძე, ც. გუგავა. ტრანსფორმატორის მყარი იზოლაციის ნარჩენი საექსპლუატაციო რესურსის განსაზღვრა. თბილისი, „ენერჯია“, №4, 2002წ.
20. Трансформаторы. Перенапряжения и координация изоляций. Пер. докладов международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-84) б. Под. ред. С.Д. Лузинова и А.К. Лоханина. М.: Энергоатомиздат, 1996.
21. Шахнович М.И. Синтетические жидкости для электрических аппаратов. Москва, „Энергия“, 1972, 218 с.
22. IEC 1169-97 Standard Test Method for Specific Resistance (Resistivity) of Electrical Insulating Liquids. 1997.
23. Мост переменного тока М 5026М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Москва, 2001, 28 с.
24. ჩიხლაძე რ. იზოლაციის ელექტრული გამოცდა და დიაგნოსტიკა. თბილისი, „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2010, 294 გვ.
25. РД. 34.45.51. 300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования. Москва, „Издательство НЦ ЭНАС“, 2002, 255 с.
26. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Москва, „Энергия“, 1979, 320 с.
27. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. Москва „ОРГРЕС“, 2001, 491 с.
28. Сканава Г.А. Физика диэлектриков (область сильных полей). Москва, „Энергия“, 1958, 907 с.
29. Борисова М.Э., Койков С.Н. Физика диэлектриков, Ленинград „изд. Ленинградского университета“, 1979, 240 с.