

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ზურაბ ჯანიაშვილი

საინჟინერო სისტემის დიაგნოსტიკა

წინააღმდეგობის მიხედვით

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

თბილისი

2022 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკის ფაკულტეტი
ელექტროენერგეტიკის და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი რ. ჩიხლაძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2022 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის
სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი VIII,
აუდიტორია 805.

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,
პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალურობა. მაღალი ძაბვის საიზოლაციო სისტემის მდგომარეობის შეფასება საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობის და დიელექტრიკული დანაკარგების საშუალებით წარმოებს. ორივე ეს მეთოდი თითქმის თანაბარწილად გამოიყენება 110 კვ და მეტი ძაბვის საიზოლაციო სისტემის დიაგნოსტიკა კი მხოლოდ წინააღმდეგობის სიდიდის მიხედვით წარმოებს, რომლის მნიშვნელობა მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული (ტემპერატურა, წნევა, გარემოს ტენიანობა, მოქმედი ძაბვის სიდიდე და მოქმედების ხანგრძლივობა და სხვა). უნდა აღინიშნოს, რომ საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობის მუდმივი დენის მოქმედებით ისაზღვრება, ხოლო დიელექტრიკული დანაკარგები კი ცვლადი ძაბვის ზემოქმედებით. ამ ორ სიდიდეს შორის გარკვეული კავშირი არსებობს, კერძოდ, თუ საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობა დიდია, მაშინ მისი დიელექტრიკული დანაკარგები მცირეა და პირიქით. ამასთანავე დიელექტრიკული დანაკარგების მახასიათებელი *tgd* ცვლადი სიხშირის აქტიური და რეაქტიული დენების ფარდობას წარმოადგენენ.

ლიტერატურაში ამ ფაქტორების ცალ-ცალკე და ერთდროული გავლენის შესწავლის შესახებ ინფორმაცია პრაქტიკულად არ არსებობს, აგრეთვე ლიტერატურაში არ არსებობს ინფორმაცია ტრანსფორმატორის ზეთის მდგომარეობის წინააღმდეგობის ან კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდის მიხედვით შეფასების, როგორც ძაბვის ხანგრძლივი მოქმედებით, ასევე წინააღმდეგობის მოქმედი ძაბვის სიდიდეზე დამოკიდებულება. ყოველივე ამან სადისერტაციო თემის აქტუალურობა განაპირობა.

სამუშაოს მიზანი. სამუშაო მიზნად ისახავს შეგვესწავლა და ყოველმხრივ დაგვესაბუთებინა მაღალი ძაბვის მოწყობილობების საიზოლაციო სისტემის მდგომარეობის შეფასების უპირატესობა და მეტი ინფორმაციულობა საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობის განსაზღვრის მეთოდით, სხვა მეთოდთან (კერძოდ დიელექტრიკული დანაკარგების) შედარებით. აგრეთვე გამოგვეკვლია ამ მეთოდის საშუალებით ტრანსფორმატორის ზეთის მდგომარეობის შეფასება, ზეთის ტემპერატურის მატებისას და გაცივებისას.

კვლევის ამოცანები. დასახული მიზნის მისაღწევად სადისერტაციო სამუშაოში გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. სადისერტაციო ნაშრომის შესრულებისას მოხდა მყარი საიზოლაციო სისტემის მდგომარეობის შეფასება ძაბვის ხანგრძლივი მოქმედებისას (მეტი 600 წამზე), როგორც ახალი, ასევე დაძველებული საიზოლაციო სისტემისთვის;
2. ძალოვანი ტრანსფორმატორისთვის ჩატარდა საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობის ტრადიციული მეთოდის სქემით გაზომილი შედეგებით ცალკეული ზონის წინააღმდეგობის გამოთვლა და მათი ცდომილებების ურთიერთ შედარება;
3. ძალოვანი ტრანსფორმატორისთვის ჩატარდა საიზოლაციო სისტემის ზონური მეთოდის სქემით გაზომილი შედეგებით ტრადიციული მეთოდით გაზომილ შედეგებთან შედარება და მათი ცდომილებების ურთიერთ შედარება;
4. შესწავლილი იქნა ტრადიციული და ზონური სქემებით გაზომვისას ელექტროდების გადამოკლებით დაგროვილი მუხტების მოხსნის ხანგრძლივობის გავლენა სხვადასხვა სქემებით იზოლაციის წინააღმდეგობის გაზომვის სიზუსტეზე. ნაჩვენებია ამ სიზუსტის დამოკიდებულება გადამოკლების ხანგრძლივობაზე;
5. მოხდა ტრანსფორმატორის ზეთის მდგომარეობის შეფასება ერთიდაიმავე ტემპერატურაზე წინააღმდეგობის გაზომვით ტემპერატურის მატებისას და შემცირებისას წინააღმდეგობის სიდიდეების ფარდობით, რამაც საშუალება მოგვცა მნიშვნელოვანი დასკვნების გაკეთების;
6. შესწავლილი იქნა საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობის დამოკიდებულება მოქმედი ძაბვის სიდიდეზე და ხანგრძლივობაზე.

კვლევის ობიექტი. ახალი და დაძველებული ძალოვანი ტრანსფორმატორის, ასინქრონული ძრავის საიზოლაციო სისტემა. ამ სისტემის წინააღმდეგობის სიდიდის ცვლილება, ძაბვის მოქმედების ხანგრძლივობის მიხედვით, აგრეთვე გამოკვლეული იყო ტრანსფორმატორის ახალი, რეგენირებული და დაძველებული ზეთები. მათი წინააღმდეგობა მეგაომეტრით ისაზღვრებოდა სხვადასხვა ძაბვის მოქმედებით სხვადასხვა ტემპერატურაზე, როგორც ზეთის გათბობის ასევე გაცივების პროცესში.

კვლევისთვის გამოყენებული მეთოდები. კვლევის პროცესში გამოყენებული იყო, ძალოვანი ტრანსფორმატორის და ასინქრონული ძრავის საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობის სიდიდის განსაზღვრის მეთოდი მეგაომეტრით, როგორც

გაზომვის ტრადიციული სქემით, ასევე ზონური სქემით. ამასთანავე მეტი ინფორმაციის მისაღებად გაზომვები ტარდებოდა სხვადასხვა სიდიდის მუდმივი ძაბვით.

ტრანსფორმატორის ზეთებისთვის კუთრი წინაღობა ისაზღვრებოდა წინაღობის ელექტრომეტრით გაზომვის ტრადიციული მეთოდით.

სამეცნიერო სიახლე. მიღებული შედეგებით გაკეთებულია დასკვნები, საიდანაც ჩანს, რომ მაღალი ძაბვის მოწყობილობების საიზოლაციო სისტემის დიაგნოსტიკა წინაღობის სიდიდის მიხედვით უფრო ინფორმაციულ შედეგებს იძლევა, ვიდრე დიელექტრიკული დანაკარგებით დიაგნოსტიკა, ხოლო ზოგიერთ შემთხვევაში, ისეთ დეფექტებს გამოავლენს, რასაც დიელექტრიკული დანაკარგების გაზომვის შემთხვევაში საერთოდ არ გამოვლინდება.

დადგენილია, რომ თუ ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობას განვსაზღვრავთ ზეთის გაცხელებისას და გაცივებისას ერთი და იმავე ტემპერატურაზე, მაშინ წინაღობების ფარდობით შეგვიძლია ზეთის მდგომარეობის და ტენშემცველობის შეფასება.

სამუშაოს პრაქტიკული მნიშვნელობა მაღალი ძაბვის მოწყობილობების საიზოლაციო სისტემის დიაგნოსტიკა წინაღობის სიდიდის მიხედვით უფრო კარგ შედეგებს იძლევა, ვიდრე დიელექტრიკული დანაკარგებით დიაგნოსტიკა, ხოლო ზოგიერთ შემთხვევაში, ისეთ დეფექტებს გამოავლენს, რასაც დიელექტრიკული დანაკარგების შემთხვევაში საერთოდ არ გამოვლინდება.

დადგენილია, რომ თუ ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობას განვსაზღვრავთ ზეთის გაცხელებისას და გაცივებისას ერთიდაიმავე ტემპერატურაზე, მაშინ წინაღობების ფარდობით შეგვიძლია ზეთის მდგომარეობის შეფასება.

რეალურ ობიექტებზე მიღებული შედეგები რეკომენდირებულია პრაქტიკული გამოყენებისთვის.

სამუშაოს აპრობაცია სამუშაოს ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 5 სამეცნიერო სტატიაში. ასევე, მოხსენებულ იქნა: 2020 წ. ქ. თბილისში გამართულ მე-2 სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე - „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“; 2021 წ. ქ. ტოკიოს (იაპონია) მე-4

საერთაშორისო (TOKYO SUMMIT-IV) კონფერენციაზე და საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში ელექტროენერგეტიკის და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტში გამართულ პირველ, მეორე და მესამე კოლოქვიუმებზე და წინასწარ დაცვაზე.

დისერტაციის სტრუქტურა. სადისერტაციო სამუშაო წარმოდგენილია 104 გვერდზე და შედგება: შესავალისაგან, ოთხი თავისაგან, დასკვნისაგან და 27 დასახელების ლიტერატურული წყაროს სიისაგან. სამუშაო ილუსტრირებულია 19 ნახაზითა და და 16 ცხრილით.

ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

დისერტაციის შესავალში აღწერილია საიზოლაციო სისტემის დაზიანების მიზეზები, მათი გამოვლენის მეთოდები და შედარებულია საიზოლაციო სისტემის დიელექტრიკული დანაკარგებით დიაგნოსტიკის შედეგების წინააღმდეგობის განსაზღვრით მიღებულ დიაგნოსტიკის შედეგებთან. გამოტანილია შესაბამისი დასკვნები.

ლიტერატურულ მიმოხილვაში ნაჩვენებია საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობის მიხედვით დიაგნოსტიკის საკითხისადმი მიძღვნილი არსებული ინფორმაციის სიმცირე და ზოგიერთ შემთხვევაში წინააღმდეგობებიც.

ნაშრომის პირველ თავში აღწერილია ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლების გასაზომად გამოყენებული ხელსაწყოები. განხილულია სპეციალურად ამ მიზნით შექმნილი ტრანსფორმატორის შექმნილი ტრანსფორმატორის კუთრი წინააღმდეგობის გასაზომი დანადგარი და სტანდარტის მიხედვით დამზადებული ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინააღმდეგობის გასაზომი უჯრედი.

აღწერილია წინააღმდეგობის გასაზომი E6-13A ტიპის ტერაომეტრის მუშაობის პრინციპი და გაზომვის თავისებურებები. აღნიშნული დანადგარი აღჭურვილია ტემპერატურის ავტომატური რეგულირების და გათანაბრების სქემით. მას გააჩნია ტემპერატურის გაზომვის სტანდარტის შესაბამისი სიზუსტე $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

იმისათვის, რომ შეფასდეს ტრანსფორმატორის ზეთის მდგომარეობა კუთრი წინააღმდეგობის გარდა მნიშვნელოვანია განისაზღვროს სხვა ძირითადი პარამეტრები, როგორცაა ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავის კლასი და ტენშემცველობა. ეს ორი პარამეტრი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდეზე.

ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლები განსაზღვრავს, ზეთის გამოყენების შესაძლებლობას სხვადასხვა, ძაბვის და დანიშნულების ზეთით შევსებულ ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში. ზეთი მდგომარეობის მიხედვით იყოფა:

1. ახალი ანუ ნედლი ზეთი;
2. ელექტრომოწყობილობაში ჩასასხმელად მომზადებული ახალი ზეთი;

3. ელექტრომოწყობილობაში ჩასასხმელად მომზადებული რეგენირებული;
4. საექსპლუატაციო ზეთი;
5. ექსპლუატაციისთვის უვარგისი ანუ სარეგენერაციო ზეთი;

მეორე თავში განხილულია ის ორგანული და არაორგანული წარმოშობის მყარი საიზოლაციო მასალები, რომლებიც მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორების და გენერატორების საიზოლაციო სისტემის შესაქმნელად გამოიყენება. განხილულია ამ მასალების დამკვლევა ელექტრული ველის და ტემპერატურის მოქმედებით. განხილულია დამკვლევების პროდუქტების გავლენა ამ მასალების ელექტრულ თვისებებზე, კერძოდ წინაღობის სიდიდეზე.

საიზოლაციო სისტემის წინაღობის განსაზღვრის თვალსაზრისით განხილულია მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორის, გენერატორის და ძრავების საიზოლაციო სისტემის შესაქმნელად გამოყენებული მასალები და ამ მასალებით შექმნილი კონსტრუქციები, ამ კონსტრუქციების წინაღობის გაზომვის მეთოდები, წესები და გამოყენებული ხელსაწყოები.

ნაჩვენებია საიზოლაციო სისტემის წინაღობის სიდიდეზე ტრანსფორმატორის ზეთის და ელექტროტექნიკური ქაღალდის ტემპერატურის და ტენშემცველობის და დამკვლევების პროცესში წარმოქმნილი წყლის მოლეკულების გავლენა.

განხილულია დამკვლევების შედეგად წარმოქმნილი თავისუფალი რადიკალების გავლენას ზეთ-ბარიერული სისტემის წინაღობაზე და მინარევების მგრადობაზე.

ნაშრომის მესამე თავში მოცემულია ტრანსფორმატორის ახალი, რეგენირებული, საექსპლუატაციო ნორმის ნორმალური მდგომარეობის და ზღვრული დასაშვები ნორმის შესაბამისი ზეთის კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, როგორც ტემპერატურის მატებისას, ასევე ტემპერატურის კლებისას. შედარებულია ერთი და იმავე ტემპერატურაზე ამ ორი მეთოდით გაზომილი წინაღობების სიდიდეები. განსაზღვრულია ამ წინაღობების ფარდობის კოეფიციენტი. ნაჩვენებია, რომ რაც მეტია ეს ფარდობა, მით მეტად დაძველებულია და მეტ მინარევებს შეიცავს ტრანსფორმატორის ზეთი.

ამ მიზნით ჩვენს მიერ გამოყენებული იყო საექსპლუატაციოდ მომზადებული ახალი T-1500 მარკის ზეთი (ნიმუში №1), რომელიც განკუთვნილი იყო 110 კილოვოლტიან ტრანსფორმატორში ჩასასხმელად და T-1500 მარკის ექსპლუატაციაში ნამყოფი ზეთი, რომელსაც ჩაუტარდა რეგენერაცია და მომზადებული იყო 110 კილოვოლტიან ტრანსფორმატორში ჩასასხმელად (ნიმუში №2). ორივე ამ ზეთებში ტენშემცველობა შესაბამისად 9,9 ppm და 9,6 ppm-ს შეადგენს, ხოლო სისუფთავის კლასი კი ორივე ნიმუშის X კლასს შეესაბამება.

შედარებისთვის აღებული იყო ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთი, რომლის მახასიათებლები საექსპლუატაციო ნორმის ნორმალურ მდგომარეობას შეესაბამებოდა, რომლის ტენშემცველობა 19 ppm შეადგენდა, ხოლო სისუფთავე კი XII კლასს შეადგენდა (ნიმუში №3). აგრეთვე აღებული იყო 110 კილოვოლტიანი ტრანსფორმატორიდან აღებული ზეთი, რომლის მახასიათებლები საექსპლუატაციო ნორმის ზღვრულ დასაშვებ მდგომარეობას შეესაბამებოდა (ნიმუში №4).

ნიმუშების წინაღობა ისაზღვრებოდა ტემპერატურის 20°C-დან 120°C ინტერვალში ტემპერატურის 10°C-ის ბიჯით ტემპერატურის მატების (გათბობის) და კლების (გაცივების) ეტაპებზე. იმისათვის, რომ არ მომხდარიყო ტენის აორთქლება გაზომვები ტარდებოდა საჭირო ტემპერატურის მიღწევიდან 1 წუთის შემდეგ.

ნიმუშის ტემპერატურის მატების ან კლების სიჩქარე შეადგენდა 10°C-წუთში, რაც თითქმის გამორიცხავდა ტენის აორთქლებას ნიმუშიდან.

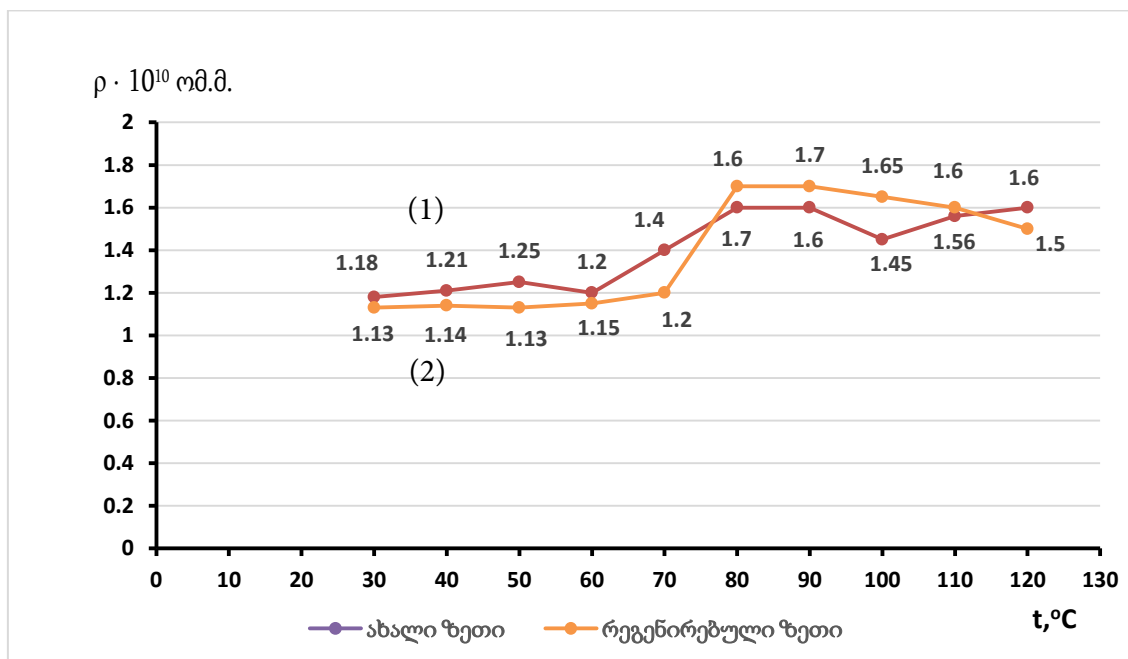
ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის მნიშვნელობები ახალი და რეგენირებული ზეთებისთვის სხვადასხვა ტემპერატურაზე, ზეთის ტემპერატურის მატებისას და გაცივებისას მოყვანილია ცხრილ 1-ში.

ამავე ცხრილში მოყვანილია კუთრი წინაღობის მატების ან კლების ფარდობის კოეფიციენტები, რომელიც, თუ ტემპერატურის ბიჯი თანაბარია, მაშინ ტრანსფორმატორის ერთგვაროვანი ზეთისთვის ტემპერატურიან ნებისმიერ ინტერვალში თითქმის თანაბრად იზრდება ტემპერატურის მატებასთან ერთად, არ გააჩნია ამოვარდნები. როგორც გრაფიკიდან (ნახ. 1.) ჩანს, ახალი და რეგენირებული ზეთები ხასიათდებიან კუთრი წინაღობის შემცირების თითქმის

ტოლი სიდიდის კოეფიციენტებით და მათი ცვლილების ხასიათი ტემპერატურის მიხედვით მსგავსია.

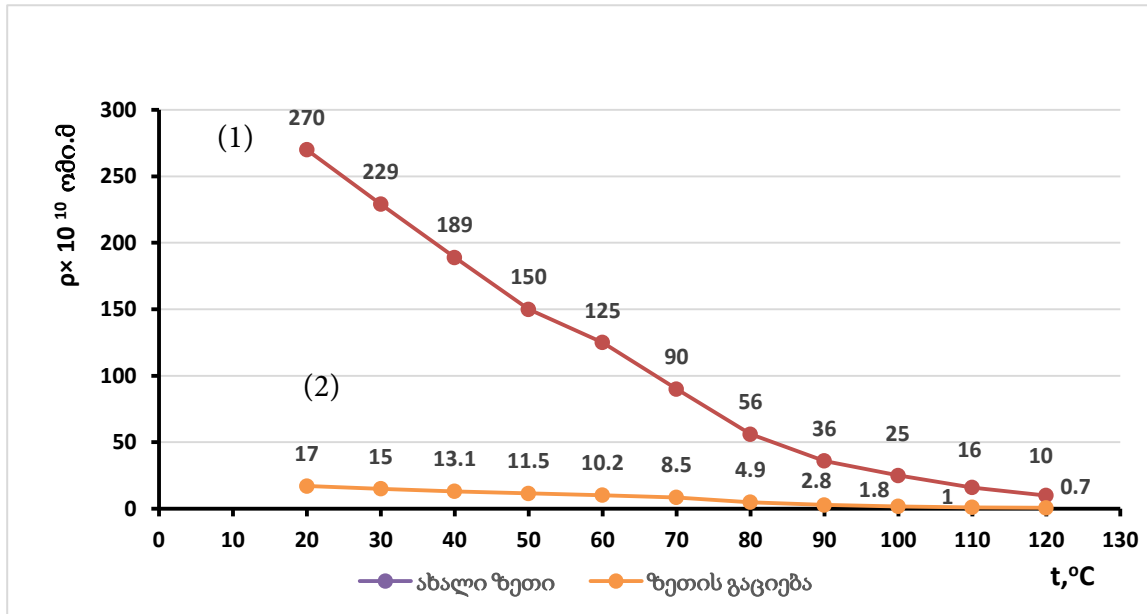
ცხრილი 1. ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთის კუთრი წინაღობის ცვლილება ტემპერატურის მიხედვით

$t^{\circ}C$	კუთრი წინაღობა $\times 10^{10}$ ომი.მ							
	ახალი ზეთი				რეგენირებული ზეთი			
	$\rho \uparrow$ მატება	$\kappa \uparrow$ მატება	$\rho \downarrow$ კლება	$\kappa \downarrow$ კლება	$\rho \uparrow$ მატება	$\kappa \uparrow$ მატება	$\rho \downarrow$ კლება	$\kappa \downarrow$ კლება
20	270	-	410	1,3	17,0	-	88,6	1,3
30	229	1,18	317	1,29	15	1,13	68,2	1,3
40	189	1,21	252	1,3	13,1	1,14	51,9	1,65
50	150	1,25	195	1,35	11,5	1,13	31,0	1,7
60	125	1,2	145	1,5	10,2	1,15	18,2	1,72
70	90	1,4	96	1,4	8,5	1,2	10,5	1,73
80	56	1,6	69	1,6	4,9	1,7	6,2	1,75
90	36	1,6	43	1,6	2,8	1,7	3,6	1,7
100	25	1,45	27	1,54	1,8	1,65	2,1	1,75
110	16	1,56	17	1,75	1,0	1,6	1,2	1,70
120	10	1,6	10	-	0,7	1,5	0,7	-



ნახ 1. ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთის და კუთრი წინაღობის ტემპერატურის მიხედვით შემცირების კოეფიციენტის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკი

ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთის კუთრი წინაღობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკიდან (ნახ. 2.) ჩანს, რომ ეს ორი გრაფიკი ერთმანეთისგან არ განსხვავდება და ორივე შემთხვევაში კუთრი წინაღობა ტემპერატურის გაზრდით ექსპოტენციალურად მცირდება, რაც კარგად ემთხვევა ზემოთ მოყვანილ თეორიულ მოსაზრებას.



ნახ. 2. ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთის და კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

როდესაც ტრანსფორმატორის ზეთის ტემპერატურა ნორმალურ წნევაზე 90°C აღემატება, მაშინ ზეთიდან არამარტო გახსნილი წყლის, არამედ ბმული წყლის აორთქლებაც იწყება. მაგრამ ტემპერატურის 100-120°C-ის ინტერვალში წყლის მოლეკულების აორთქლება ინტენსიურად მიმდინარეობს. აქვე აღმოჩნდება, რომ ახალი და რეგენირებული ზეთის კუთრი წინაღობები გაცივებისას უფრო მეტია, ვიდრე ტემპერატურის მატებისას. ეს მოვლენა ზეთში არსებული წყლის აორთქლებით აიხსნება.

ტემპერატურის კლებისას კუთრი წინაღობის მატება რეგენირებული ზეთისთვის უფრო მეტია, ვიდრე არარეგენირებული ზეთისთვის, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ ტრანსფორმატორის ზეთის რეგენერაცია არ იყო კარგად ჩატარებული და რეგენირებულ ზეთში დარჩენილი იყო ტრანსფორმატორის

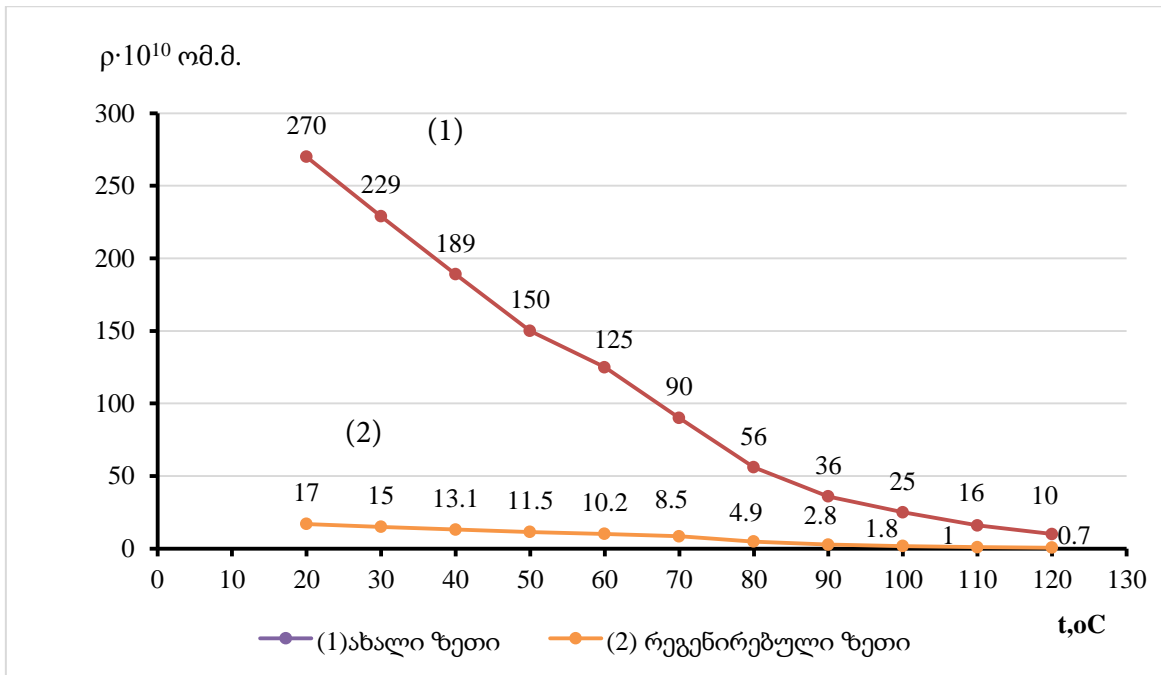
ზეთის დამველების პროდუქტები, ძირითადად ზეთის მოლეკულებთან დაკავშირებული წყალი.

თუ მოვახდენთ ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის შედარებას ზეთის ტემპერატურის მატებისას $\rho \uparrow$ და გაცივების $\rho \downarrow$ ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთისთვის აღმოჩნდება, რომ რეგენირებული ზეთისთვის ეს განსხვავება უფრო მეტია, მაღალ ტემპერატურაზე ველის მოქმედებით რეგენირებული ზეთისგან ადვილად აორთქლებადი და მაღალ ძვრადობის მქონე ზეთის მოლეკულებთან სუსტად ბმული მინარევების აორთქლებით აიხსნება. ამ მოსაზრებას ადასტურებს $\rho \downarrow / \rho \uparrow$ ფარდობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ახალი და რეგენირებული ზეთებისთვის.

ტემპერატურის მატებისას და კლებისას კუთრი წინაღობებს შორის სხვაობა უფრო მეტად დაბალ (20-30°C) ტემპერატურა ჩანს, ვიდრე მაღალ (80-120°C), ამის გამო ამ ეფექტის გამოსავლენად საკმარისია გავზომოთ წინაღობა 20°C ან 30°C ტემპერატურაზე, კერძოდ გავაცხელოთ ზეთი 100-120°C ტემპერატურაზე, დავაყოვნოთ 10-15 წუთი ამ ტემპერატურაზე და შემდეგ თერმოსტატთან ერთად გავაცივოთ (რომ არ აიღოს ტენი გარემოდან). გაცივების შემდეგ წინაღობა საწყის ტემპერატურაზე გავზომოთ. თუ ამ ორი წინაღობის ფარდობა ორს აღემატება, მაშინ ზეთი ცუდად არის მომზადებული ან რეგენირებული.

მაღალ ტემპერატურაზე კუთრი წინაღობების ფარდობა ნაკლებია, ვიდრე დაბალ ტემპერატურაზე, რაც ტემპერატურის გაზრდისას ზეთის სიბლანტის შემცირებით, ნარჩენი მინარევების იონების ძვრადობის გაზრდით აიხსნება.

ზემოთ განხილულის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ ტრანსფორმატორის რეგენირებული ან საექსპლუატაციოდ მომზადებული ახალი ზეთები თუ ცუდად არის მომზადებული, მაშინ კუთრი წინაღობების ფარდობის სიდიდე ტემპერატურის მატებისას და გაცივებისას $\rho \downarrow / \rho \uparrow$ დაბალ ტემპერატურაზე (20-30°C) ორს აღემატება, ხოლო კარგად მომზადებული ზეთებისთვის ის 2-ზე ნაკლებია.



ნახ. 3. ტრანსფორმატორის ახალი (1) და რეგენირებული (2) ზეთის კუთრი წინაღობების ფარდობის $\rho \downarrow / \rho \uparrow$ დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

პრაქტიკული გამოყენებისთვის მნიშვნელოვანია ექსპლუატაციაში მყოფი ტრანსფორმატორის ზეთების წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. ამ მიზნით გამოკვლეული იყო ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთი, რომლის მახასიათებლები შეესაბამება საექსპლუატაციო ნორმის ნორმალურ მდგომარეობას (ნიმუში №3) და ზეთი, რომლის მახასიათებლები შეესაბამება საექსპლუატაციო ნორმის ზღვრულ დასაშვებ მდგომარეობას.

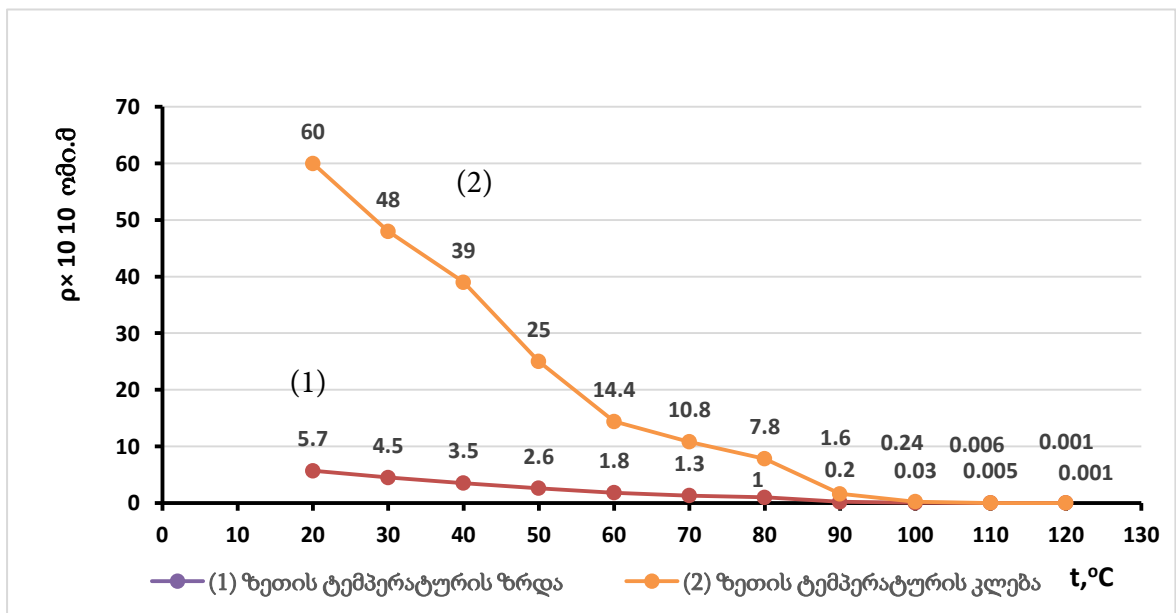
ამ ზეთებისთვის ტემპერატურის მატების და გაცივებისას კუთრი წინაღობის სიდიდეები და შესაბამისი მატების და კლების კოეფიციენტები მოყვანილია ცხრილ 2-ში.

თუ ამ ზეთისთვის გამოვთვლით ერთი და იმავე ტემპერატურაზე კუთრი წინაღობების ფარდობას ტემპერატურის მატებისას და კლებისას ვნახავთ, რომ ტემპერატურის მატებით წინაღობითი ფარდობის კოეფიციენტი მცირდება, მაგრამ ტემპერატურის (20-40°C) ინტერვალში თითქმის ორჯერ მეტია, ვიდრე ახალი ან რეგენირებული ზეთისთვის.

ცხრილი 2. საექსპლუატაციო ნორმის ნორმალური და ზღვრული მდგომარეობის შესაბამისი ზეთების კუთრი წინაღობის ცვლილება ტემპერატურის მიხედვით

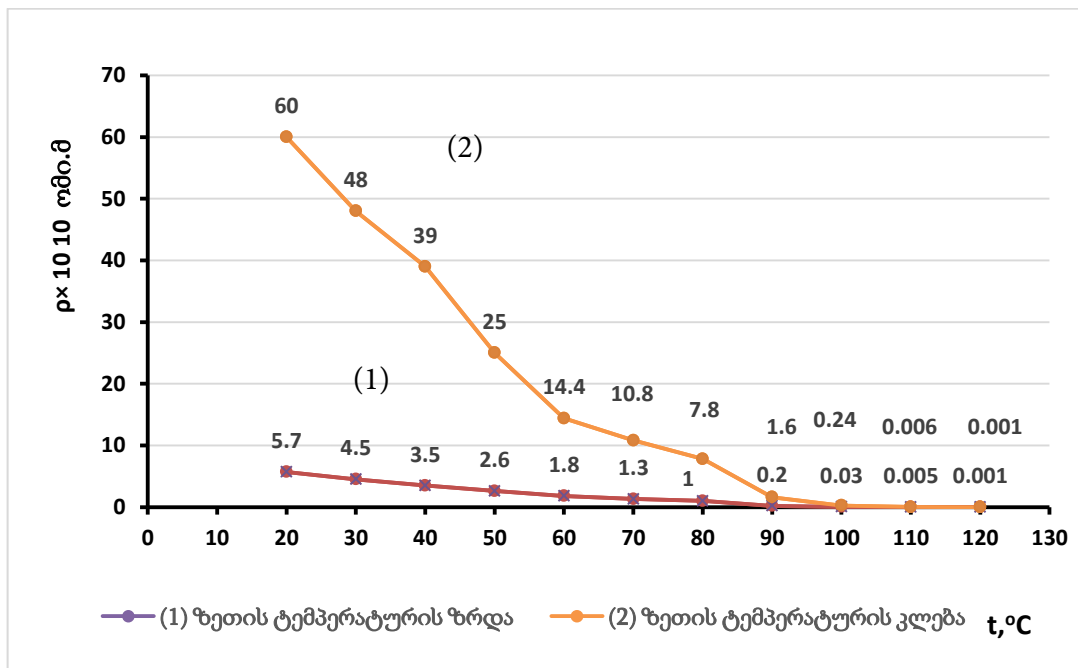
t °C	კუთრი წინაღობა × 10 ¹⁰ ომი.მ							
	ნორმალური მდგომარეობის შესაბამისი				ზღვრული მდგომარეობის შესაბამისი			
	ρ ↑ მატება	κ ↑ მატება	ρ ↓ კლება	κ ↓ კლება	ρ ↑ მატება	κ ↑ მატება	ρ ↓ კლება	κ ↓ კლება
20	38	-	275	1,53	5,7	-	60	1,25
30	30	1,27	180	1,55	4,5	1,27	48	1,23
40	23	1,23	118	1,5	3,5	1,28	39	1,56
50	17	1,35	80	1,5	2,6	1,35	25	1,74
60	12,5	1,37	53	1,75	1,8	1,45	14,4	1,33
70	9,0	1,4	30,5	1,75	1,3	1,38	10,8	1,4
80	6,4	1,41	18,9	1,72	1,0	1,3	7,8	4,9
90	4,5	1,42	11,0	1,65	0,2	5	1,6	6,7
100	3,1	1,43	6,7	1,62	0,03	6,7	0,24	40
110	2,2	1,4	4,1	2,7	0,005	6	0,006	6
120	1,5	1,5	1,5	-	0,001	5	0,001	-

საექსპლუატაციო მდგომარეობის ზღვრული დასაშვები მდგომარეობის შესაბამისი ტრანსფორმატორის ზეთისთვის კუთრი წინაღობის ტემპერატურის მიხედვით ცვლილების გრაფიკი გვაჩვენებს, რომ ტემპერატურის კლებისას (ნახ. 4.)



ნახ 4. კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ექსპლუატაციის ზღვრული მდგომარეობის შესაბამისი ტრანსფორმატორის ზეთისთვის ტემპერატურის მატებაზე (1) და კლებაზე (2)

წინაღობის მნიშვნელობა თითქმის ათჯერ მეტია, ვიდრე საწყის მდგომარეობაში, რაც ზეთის ძლიერ დაძველებაზე მიუთითებს.



ნახ. 5. საექსპლუატაციო ნორმის ნორმალური (1) და ზღვრული დასაშვები (2) მდგომარეობის შესაბამისი ტრანსფორმატორის ზეთების კუთრი წინაღობების ფარდობის $\rho \downarrow / \rho \uparrow$ დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ერთი და იმავე ტემპერატურაზე კუთრი წინაღობის ტემპერატურის მატებაზე ($\rho \uparrow$) და კლებაზე ($\rho \downarrow$) ფარდობის კოეფიციენტის $\rho \downarrow / \rho \uparrow$ ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკი გვაჩვენებს, ორივე სახის ზეთებისთვის.

ფარდობის ცვლილების ხასიათი იდენტურია (ნახ. 5.) ნორმალური მდგომარეობის და ზღვრული დასაშვები მდგომარეობისას, მაგრამ ეს უკანასკნელისთვის მისი მნიშვნელობა ტემპერატურის 20-50°C ინტერვალში თითქმის 10-ს აღემატება, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ ორივე ეს ზეთები ძლიერ დაძველებულია და მოითხოვს რეგენერაციას.

მეოთხე თავში განხილულია ტრანსფორმატორის ზეთით შევსებული მაღალი ძაბვის მოწყობილობების საიზოლაციო სისტემის წინაღობის გამზომი მოწყობილობების მუშაობის პრინციპი, ელექტრული სქემა და პროგრამული

შესაძლებლობა. აღწერილია საიზოლაციო სისტემის მახასიათებლების გაზომვის ტრადიციული და ზონური მეთოდების უპირტესობები და ნაკლოვანებები.

აგრეთვე, მოყვანილია ორგრაგნილა ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის წინალობის ჩანაცვლების სქემა და ამ სქემის საშუალებით გამოყვანილია ფორმულები, რომლითაც შესაძლებელია ტრადიციული მეთოდით გაზომვის შედეგებით ცალკეული ზონის იზოლაციის წინაღობა გამოვითვალოთ და პირიქით.

გაზომვის სიზუსტის გაზრდის მიზნით დადგენილი იქნა აუცილებლობა საიზოლაციო სისტემის ყოველი გაზომვის ჩატარების შემდეგ გრაგნილების ერთმანეთთან გადამოკლების და მიწასთან ელექტრულად დაკავშირების.

მაღალი ძაბვის საიზოლაციო სისტემის მდგომარეობის შეფასება ძირითადად იზოლაციის წინალობის (R) და დიელექტრიკული დანაკარგების (tgd) სიდიდის მიხედვით წარმოებს, მაგრამ თუ საიზოლაციო სისტემის მუშა ძაბვა 35 კვ-ს არ აღემატება, მაშინ საიზოლაციო სისტემის მდგომარეობას მხოლოდ იზოლაციის წინალობის, სიდიდის მიხედვით აფასებენ.

საიზოლაციო სისტემის წინალობის განსაზღვრა ინფორმაციულია იმ შემთხვევაში, თუ საიზოლაციო სისტემა ერთ მთლიანს წარმოადგენს და არ შედგება რამოდენიმე ზონისგან, მაგრამ თუ დანადგარს სხვადასხვა სიდიდის ძაბვა გააჩნია (მაგალითად ტრანსფორმატორი - მაღალი, საშუალო და დაბალი ძაბვის გრაგნილები), მაშინ საიზოლაციო სისტემა რამოდენიმე ნაწილისგან (ზონისგან) შედგება. ამ ნაწილების დანიშნულებაა შექმნას იზოლაცია არა მარტო ავზთან, არამედ ერთმანეთთან, შესაბამისად მათ, როგორც საერთო, ასევე ინდივიდუალური დანიშნულება გააჩნია. იმისათვის, რომ საერთო დანიშნულების მდგომარეობა შევაფასოთ, აუცილებელია ერთის მახასიათებელი განვსაზღვროთ დანარჩენის მიმართ (გაზომვის ტრადიციული), ხოლო ინდივიდუალური დანიშნულების შეფასებისას აუცილებელია ცალკეული ნაწილის (ზონის) მახასიათებელის განსაზღვრა. ამასთანავე უნდა გამოვრიცხოთ დანარჩენი ზონის გავლენა (გაზომვის სქემაში ხელსაწყოს ეკრანის გამოყენება).

საიზოლაციო სისტემის წინალობას მასზე მუდმივი ძაბვის მოქმედებით გამავალი დენის სიდიდე განსაზღვრავს, მაგრამ დენის სიდიდე დროის მიხედვით

იცვლება და მისი სიდიდე ნებისმიერ შემთხვევაში გამჭოლი გამტარებლობის დენის და პოლარიზაციის დენების ჯამს წარმოადგენს. როგორც ცნობილია, პოლარიზაციის დენი პოლარიზაციის მექანიზმის დამყარების შემდეგ მცირდება და თანდათანობით მიილევს. შესაბამისად იზოლაციის წინააღმდეგ გამჭოლი გამტარებლობის დენი განსაზღვრავს, რომლის სიდიდე დენის მატარებლების ტიპის, ელექტრული ველის დაძაბულობის და ძაბვის მოქმედების ხანგრძლივობის მიხედვით იცვლება. ეს უკანასკნელი ფაქტორი იმდენად მნიშვნელოვანია, რომ ზოგიერთ შემთხვევაში მისი სიდიდე ძაბვის მოქმედების დაწყებიდან 15 საათის შემდეგაც კი იზრდება.

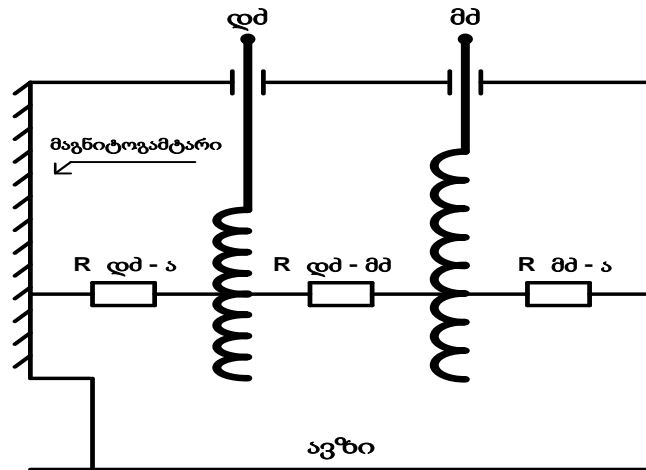
სწრაფად მიმდინარე პოლარიზაციის პროცესები ძაბვის მოქმედებიდან რამოდენიმე წამის განმავლობაში დამყარებულია და შესაბამისი დენის სიდიდეც ნოლის ტოლია. ამის გამო მახასიათებლების განსაზღვრა მიზანშეწონილია ძაბვის მოქმედებიდან 15 წამის შემდეგ. მას შესაბამისად R_{15} -ით აღნიშნავენ.

თუ წყლის მოლეკულების კონცენტრაცია საიზოლაციო სისტემაში მცირეა, მაშინ მათი მოძრაობით გამოწვეული მიგრაციული პოლარიზაცია, როგორც წესი 60 წამის შემდეგ სრულებით დამთავრებულია შესაბამისად აითვლება წინააღმდეგობა R_{60} . ხოლო გამჭოლ გამტარებლობაში მონაწილე მინარევების რაოდენობა თანდათანობით მცირდება (ელექტროგაწმენდა) და ეს პროცესები დიელექტრიკში ხანგრძლივად მიმდინარე პროცესებს მიეკუთვნება, რომლის ხანგრძლივობა 5 000 წამამდე გრძელდება. უფრო ინტენსიურად კი 1500 წამამდეა. ამის გამო საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობა 600 და 1200 წამის შემდეგ განსაზღვრავენ (R_{600} , R_{1200}). უფრო ხანგრძლივი გაზომვები, გაზომვის დიდი დროის გამო მიუხედავად ინფორმაციულობისა მიზანშეწონილი არ არის და მხოლოდ ახლადშექმნილი საიზოლაციო სისტემის ფუნდამენტალური გამოკვლევებისას გამოიყენება.

როგორც წესი, მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორების პასპორტში და გაზომვის საერთაშორისო ნორმაში ან ჩვენთან მოქმედ ნორმებში მხოლოდ ტრადიციული გაზომვის შედეგებია მოყვანილი და ექსპლუატაციაში გაზომვებს და შეფასებებს ამ სქემის მიხედვით ატარებენ.

განვიხილოთ ორგრაგნილა ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის ზონების ერთმანეთის მიმართ განლაგება და გაზომვის სქემაში მათი მონაწილეობა (ნახ. 6).

ტრადიციული გაზომვის შემთხვევაში დაბალი ძაბვის გრაგნილის საიზოლაციო სისტემის წინააღობა ერთმანეთთან ელექტრულად დაკავშირებული მაღალი ძაბვის გრაგნილის ($R_{დმ-მმ+ა}$) და ავზის მიმართ ($R_{დმ-ა}$) იზომება.



ნახ. 6. ორგრაგნილა ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის სქემა.

ამ შემთხვევაში ეს ორი წინააღობა ერთმანეთის მიმართ პარალელურად არიან განლაგებული და საერთო შედეგში, რომელიმე მათგანის როლის გამოხატვა შეუძლებელია. გვაქვს სამი განტოლება, სამი უცნობით, $R_{დმ-ა}$, $R_{მმ-ა}$, და $R_{მმ-დმ}$, რაც საშუალებას გვაძლევს ამ განტოლებებიდან

$$\frac{1}{R_{დმ-მმ+ა}} = \frac{1}{R_{დმ-ა}} + \frac{1}{R_{დმ-მმ}}; \quad (1)$$

$$\frac{1}{R_{მმ-დმ+ა}} = \frac{1}{R_{მმ-ა}} + \frac{1}{R_{დმ-მმ}}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{R_{მმ+დმ-ა}} = \frac{1}{R_{დმ-ა}} + \frac{1}{R_{მმ}}; \quad (3)$$

ან

$$R_{დმ-მმ} = \frac{2 \cdot R_{დმ-მმ+ა} \cdot R_{მმ-დმ+ა} \cdot R_{მმ+დმ-ა}}{R_{მმ-დმ+ა} \cdot R_{მმ+დმ-ა} + R_{დმ-მმ+ა} \cdot R_{მმ+დმ-ა} - R_{დმ-მმ+ა} \cdot R_{მმ-დმ+ა}} \quad (4)$$

$$R_{\text{დმ-ა}} = \frac{2 \cdot R_{\text{დმ-მმ+ა}} \cdot R_{\text{მმ-დმ+ა}} \cdot R_{\text{მმ+დმ-ა}}}{R_{\text{მმ+დმ-ა}} \cdot R_{\text{მმ-დმ+ა}} + R_{\text{დმ-მმ+ა}} \cdot R_{\text{მმ-დმ+ა}} - R_{\text{დმ-მმ+ა}} \cdot R_{\text{მმ+დმ-ა}}} \quad (5)$$

$$R_{\text{მმ-ა}} = \frac{2 \cdot R_{\text{დმ-მმ+ა}} \cdot R_{\text{მმ-დმ+ა}} \cdot R_{\text{მმ+დმ-ა}}}{R_{\text{მმ+დმ-ა}} \cdot R_{\text{დმ+მმ+ა}} + R_{\text{მმ-დმ+ა}} \cdot R_{\text{დმ-მმ+ა}} - R_{\text{მმ-დმ+ა}} \cdot R_{\text{მმ+დმ-ა}}} \quad (6)$$

ამ ფორმულების სიზუსტის შესამოწმებლად მოვახდინეთ ზონური გაზომვის მეთოდით მიღებული შედეგების შედარება ტრადიციული სქემით გაზომილი შედეგებიდან გამოთვლილი შესაბამისი ზონის წინაღობასთან.

გამოსაკვლევ ობიექტად აღებული იყო კომპანია „ELETTROMECCANICA COLOMBO“-ს მიერ 2021 წელს დამზადებული TTO ტიპის 6/0,4 კვ ძაბვის და 630 კილოვატის სიმძლავრის ტრანსფორმატორი.

შედარების მიზნით გაზომვები ჩატარდა ტრადიციული და ზონური მეთოდით 2500 და 5000 ვოლტი ძაბვით. ასევე მოვახდინეთ შედარება ამ გაზომვების და გამოთვლის შედეგების.

ცხრილი 3. წინაღობა გაზომილი და გამოთვლილი 2500 ვოლტით

№	გასაზომი ზონა	გაზომილი შედეგი	გამოთვლილი ფორმულით	განსხვავება გამოთვლილსა და გაზომილს შორის %	
				შედეგი	ნორმა
1	დმ - მმ + ა	510	-	-	≤ 10
2	მმ - დმ + ა	1210	-	-	
3	დმ + მმ - ა	470	-	-	
4	დმ - ა	317	306	-3,6	
5	მმ - დმ	1500	1535	+2,4	
6	მმ - ა	1016	1006	-0,9	

ცხრილი 4. წინაღობა გაზომილი და გამოთვლილი 5000 ვოლტით (მეგაომი)

№	გასაზომი უბანი	გაზომილი შედეგი	გამოთვლილი ფორმულით	განსხვავება გამოთვლილსა და გაზომილს შორის %	
				შედეგი	ნორმა
1	დმ - მმ + ა	500			≤ 10
2	მმ - დმ + ა	1190			
3	დმ + მმ - ა	480			
4	დმ - ა	300	318	+5,7	
5	მმ - დმ	1295	1341	+3,5	
6	მმ - ა	1142	1082	-5,6	

ცალკეულ გაზომვებს შორის ყველა გრაგნილს ავზთან და მიწასთან ელექტრული დაკავშირების (გადამოკლების) ხანგრძლივობა მიღებულისგან განსხვავებით 15 წუთს შეადგენდა, რის გამოც გაზომილსა და გამოთვლილ სიდიდეებს შორის სხვაობა მნიშვნელოვნად შემცირდა.

ორივე ცხრილიდან ჩანს, რომ გაზომვის და გამოთვლის შედეგები კარგად ემთხვევა ერთმანეთს, მაგრამ უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტროდების გადამოკლების ხანგრძლივობა 15 წუთზე ნაკლები არ უნდა იყოს. ამ შემთხვევაში გაზომვების ჩატარების დრო მნიშვნელოვნად იზრდება. მაგრამ მიღებული შედეგები გაცილებით ზუსტია.

მეოთხე თავის ექსპერიმენტალურ ნაწილში განხილულია და ერთმანეთს შედარებულია საიზოლაციო სისტემის მდგომარეობის შეფასება აბსორბციის კოეფიციენტის და პოლარიზაციის ინდექსით. ასევე ნაჩვენებია, პოლარიზაციის ინდექსის უპირატესობა აბსორბციის კოეფიციენტთან შედარებით. მიღებული შედეგების ინფორმაციულობის გაზრდის მიზნით გამოვლინდა გაზომვის დროის გაზრდის აუცილებლობა.

იზოლაციის წინაღობას მასზე მუდმივი ძაბვის მოქმედებით გამავალი დენი განსაზღვრავს, რომელიც ზოგადად პოლარიზაციის და გამჭოლი გამტარობის დენების ჯამს წარმოადგენს, როგორც ცნობილია პოლარიზაციის დენს პოლარიზაციის მექანიზმი განსაზღვრავს და დროის მიხედვით სწრაფად იცვლება. პოლარიზაციის დამყარების შემდეგ ის ნულის ტოლია და დიელექტრიკში მხოლოდ გამჭოლი გამტარობის დენი გადის, რომლის სიდიდეს დენის მატარებლების კონცენტრაცია და ტიპი განაპირობებს. თუ ეს დენი მინარევების იონებით ან წყლის მოლეკულებით არის განპირობებული, მაშინ მათი გარკვეული რაოდენობა, რომლებიც ელექტროდს (სტატორს ან გრაგნილს) მიაღწევს, მისგან იღებს მუხტს და ნეიტრალური ხდება (ელექტროგაწმენდა). ე.ი. არ მონაწილეობს ელექტროგამტარობაში. როდესაც საწყის მდგომარეობაში დენის მატარებლების კონცენტრაცია მცირეა, მაშინ ნეიტრალურ მდგომარეობაში გადასული იონების ან წყლის მოლეკულები ამცირებენ დენს და შესაბამისად იზრდება წინაღობა.

წყლის მოლეკულების მცირე კონცენტრაციის შემთხვევაში პოლარიზაციის ეს მექანიზმი 30-40 წამის განმავლობაში დამყარებულია, ე.ი. წყლის მოლეკულების

რაოდენობის შესაფასებლად მოხერხებულია წინააღმდეგობის განსაზღვრა ძაბვის მოქმედების დაწყებიდან 15 და 60 წამის შემდეგ, R_{15} და R_{60} . მათი თანაფარდობით შესაძლებელია წყლის როლის შეფასება, რომელსაც დიელექტრიკული აბსორციის კოეფიციენტი უწოდებენ.

თუ პირველი 60 წამის განმავლობაში გამჭოლი დენის სიდიდეს 30-40 %-ით მცირდება წყლის მოლეკულების ელექტროგაწმენდის მექანიზმით, მაშინ ითვლება, რომ წყლის მოლეკულების რაოდენობა ძალიან მცირეა (იზოლაცია ნაკლებად ტენიანია).

გამჭოლ გამტარებლობაში მონაწილე მინარევების რაოდენობა კი 60 წამის შემდეგ ძირითადად შემცირებულია და დენი შედარებით ნაკლებად იზრდება. მაგრამ თუ დიელექტრიკი დაძველებულია, მაშინ გამჭოლი გამტარობის დენში მონაწილე მინარევების რაოდენობას დაძველებული მოლეკულებიდან წარმოქმნილი იონების და ელექტრონების რაოდენობა ემატება, რომლის სიდიდე 300-600 წმის განმავლობაში არ მცირდება. ამის გამო იზოლაციის მდგომარეობას პოლარიზაციის ინდექსის საშუალებით ახდენენ (PI, Polarization Index).

პოლარიზაციის ინდექსი გვიჩვენებს ველის მოქმედებით დიელექტრიკში დამუხტული ნაწილაკების გადაადგილების შესაძლებლობას და წარმოქმნის მექანიზმს. მისი სიდიდე დიდ დიაპაზონში იცვლება: თუ პოლარიზაციის ინდექსის სიდიდე ≤ 1 , ანუ R_{60} და R_{600} პრაქტიკულად არ განსხვავდება ერთმანეთისაგან ან ზოგჯერ ზოგჯერ $R_{600} < R_{60}$. ეს ნიშნავს, რომ დიელექტრიკი იმდენად დაძველებულია, რომ ველის მოქმედებით დენის ახალი ნაწილაკები წარმოიქმნება. მათი წარმოქმნა დაძველებული მოლეკულებიდან იონების ან „თავისუფალი“ ელექტრონების მოწყვეტით აიხსნება. ასეთ საიზოლაციო სისტემას საექსპლუატაციო რესურსი ამოწურული აქვს და მისი ექსპლუატაცია დიდ რისკთან არის დაკავშირებული, რადგან ექსპლუატაციისას შესაძლებელია იზოლაციის მდგომარეობის კიდევ გაუარესება.

ამ შემთხვევაში შეიძლება ჩათვალოს, რომ მყარი იზოლაციის (ელექტროტექნიკური ქაღალდი) პოლიმერიზაციის საშუალო ხარისხი 100 ერთეულზე ნაკლებია და სავარაუდოდ მყარმა იზოლაციამ თავისი

საექსპლუატაციო რესურსი ამოწურა. ეს მოსაზრება ღრმა შესწავლას მოითხოვს და შეიძლება გახდეს პოლიმერიზაციის ხარისხით ნარჩენი საექსპლუატაციო რესურსის დადგენის არსებული მეთოდის ალტერნატივა.

- როდესაც პოლარიზაციის ინდექსის სიდიდე 1-დან 2-მდეა, მაშინ დენი თითქმის ორჯერ მცირდება, მაგრამ დენის სიდიდეზე დაძველების პროდუქტებით წარმოქმნილი დენის მატარებლების გავლენაც ჩანს და შესაძლებელია არსებობს ელექტროგაწმენდით გამოწვეული მინარევების კონცენტრაციის შემცირება, მაგრამ ასევე, დენის მატარებლები წარმოიქმნება დაძველებული იზოლაციისგანაც. ამასთანავე წინაღობის მაქსიმუმ ორჯერ ზრდა იმის მიმანიშნებელია, რომ ორივე მექანიზმი მიმდინარეობს და აქ რაიმეს ცალსახად მტკიცება შეუძლებელია.

- კარგ მდგომარეობაში მყოფ დიელექტრიკში ძაბვის მოქმედებიდან 600 წამის შემდეგ მინარევებით წარმოქმნილი დენის მატარებლების რაოდენობა საგრძნობლად შემცირებულია, ხოლო დაძველების პროდუქტებით წარმოქმნილი დენის მატარებლების რაოდენობა თითქმის ნულის ტოლია. ამ შემთხვევაში პოლარიზაციის ინდექსი 2-დან 4-მდე იცვლება.

- საუკეთესო მდგომარეობაში მყოფი საიზოლაციო სისტემაში ძაბვის მოქმედების დაწყებიდან 600 წამისთვის მინარევების რაოდენობა მნიშვნელოვნადაა შემცირებული, ამასთანავე იზოლაციის დაძველებას ადგილი არ აქვს, შესაბამისი დენის სიდიდეც ნულის ტოლია და პოლარიზაციის ინდექსის სიდიდე 4-ს აღემატება.

განვიხილოთ კომპანია CHONCONG ELECTRIC MACHINE მიერ 2015 წელს დამზადებული 1600 კილოვატი სიმძლავრის და 10000 ვოლტის ძაბვის ძრავის სამივე ფაზის საიზოლაციო სისტემის წინაღობის კორპუსის მიმართ დამოკიდებულება ძაბვის მოქმედების ხანგრძლივობაზე.

გაზომვები ჩატარდა 2500 და 10000 ვოლტ ძაბვაზე, როდესაც საიზოლაციო სისტემის ტემპერატურა 34°C-ის ტოლი იყო.

ცდის შედეგები მოყვანილია ცხრილ 5-ში, სადაც ჩანს, რომ გაზომვის ძაბვის 4-ჯერ გაზრდით:

1. საიზოლაციო სისტემის წინაღობა ძაბვის მოქმედების ერთი და იმავე მომენტისთვის გაზომვის ცდომილების ფარგლებში თითქმის ტოლია.

2. ძაბვის მოქმედების ხანგრძლივობის გაზრდით საიზოლაციო სისტემის წინაღობა მონოტონურად იზრდება.

ცხრილი 5. გაზომვის შედეგები

ძაბვა ვოლტი	წინაღობა მეგაომი					$K_{\text{ახ.}}$		პოლარიზაციის ინდექსი	
	R_{15}	R_{160}	R_{200}	R_{400}	R_{600}	შედეგი	ნორმა	შედეგი	ნორმა
2500	610	1150	2020	4020	5720	1,88	$\geq 1,3$	4,97	≥ 2
10 000	605	1160	2030	4010	5702	1,9	$\geq 1,3$	4,92	≥ 2

ეს ორი დამოკიდებულება იმის მაჩვენებელია, რომ საიზოლაციო დაძველების პროცესი არ მიმდინარეობს და მინარევების რაოდენობა ძალიან მცირეა. ამ მოსაზრებას ამტკიცებს მიღებული შედეგებით გამოთვლილი აბსორბციის კოეფიციენტის და პოლარიზაციის ინდექსის მნიშვნელობები.

დასკვნა

1. ლიტერატურის მიმოხილვა და ანალიზი საშუალებას გვაძლევს, რომ როგორც მეცნიერული, ასევე პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით აუცილებელია შევისწავლოთ თხევადი და მყარი იზოლაციის ან მათი საშუალებით წარმოქმნილი ზეთ-ბარიერული საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობის დამოკიდებულება მუდმივი ძაბვის მოქმედების ხანგრძლივობაზე.
2. ტრანსფორმატორის რეგენირებული ან საექსპლუატაციოდ მომზადებული ახალი ზეთები თუ ცუდად არის მომზადებული, მაშინ კუთრი წინააღმდეგობის ფარდობის სიდიდე ტემპერატურის მატებისას და გაცივებისას $\rho \downarrow / \rho \uparrow$ დაბალ ტემპერატურაზე ($20-30^{\circ}\text{C}$) ორს აღემატება, ხოლო კარგად მომზადებული ზეთებისთვის ის 2-ზე ნაკლებია.
3. საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნების შესაბამისი ზეთების კუთრი წინააღმდეგობის ტემპერატურის მატებისას და კლებისას ფარდობის კოეფიციენტის სიდიდე ტემპერატურის 20 -დან 50°C ინტერვალში $5-6$ აღემატება, ამ შემთხვევაში ზეთს აუცილებელია ჩაუტარდეს რეგენერაცია, რადგან ზეთი ხასიათდება მაღალი ტენშემცველობით და ელექტროგამტარობაში მონაწილე მინარევების დიდი რაოდენობით.
4. ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის ცალკეული ზონის მახასიათებლები შეიძლება განვსაზღვროთ ან ზონების მახასიათებლები გავზომოთ ან ტრადიციული მეთოდით გაზომილი შედეგებიდან გამოვითვალოთ.
5. საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობის გაზომვის ჩატარებისას ყოველი გაზომვის შემდეგ აუცილებელია გრაფილების არანაკლებ 15 წუთით გადამოკლება და ელექტრულად მიწასთან დაკავშირება. თუ გაზომვებს ამ პირობების შესრულებით ჩავატარებთ, მაშინ ტრადიციული სქემით გაზომვის შედეგებით, შეგვიძლია საიზოლაციო სისტემის ნებისმიერი ზონის წინააღმდეგობის სიდიდის დიდი სიზუსტით განსაზღვრა.

6. თუ მაღალი ძაბვის ძრავის იზოლაცია კარგ მდგომარეობაში იმყოფება, მასში არ არის შეღწეული ტენი და არ მიმდინარეობს საიზოლაციო სისტემის დაძველება, მაშინ საიზოლაციო სისტემის წინაღობა კორპუსის მიმართ არ არის დამოკიდებული მოქმედი ძაბვის სიდიდეზე და ძაბვის მოქმედების ხანგრძლივობაზე. ასევე აბსორბციის კოეფიციენტის და პოლარიზაციის ინდექსის მნიშვნელობები ნორმას აღემტებიან.
7. მაღალი ძაბვის მოწყობილობების საიზოლაციო სისტემის დიაგნოსტიკა წინაღობის სიდიდის მიხედვით შედარებით კარგ შედეგებს იძლევა, ვიდრე დიელექტრიკული დანაკარგებით დიაგნოსტიკა, ხოლო ზოგიერთ შემთხვევაში, ისეთ დეფექტებს გამოავლენს, რაც დიელექტრიკული დანაკარგების შემთხვევაში საერთოდ არ გამოვლინდება.
8. ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის განსაზღვრით ზეთის გაცხელებისას და გაცივებისას ერთიდაიმავე ტემპერატურაზე, წინაღობების ფარდობით შეგვიძლია ზეთის მდგომარეობის შეფასება.
9. მიღებული შედეგები შესაძლებელი გამოყენებული იყოს მაღალი ძაბვის მოწყობილობების დიაგნოსტიკის არსებული სტანდარტის ინფორმაციულობის გაზრდისთვის.

გამოქვეყნებული ნაშრომების სია:

1. ჩიხლაძე რ., ჩიხლაძე ქ., ჯანიაშვილი ზ. მაღალი ძაბვის შემყვანის საიზოლაციო სისტემის წინაღობის გაზომვის ტრადიციული და ზონური მეთოდების შედარება. „ენერჯია“, 2020, №4(96), ნაწილი II, გვ. 27-28.
http://www.energyonline.ge/2020/ENERGY_MPPE2020_4_96_2020_2.pdf
2. ჯანიაშვილი ზ. ორგრაგნილა ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის წინაღობის გაზომვის ტრადიციული და ზონური მეთოდების შედარება. ჟურნალი „ენერჯია“, 2020, №4(96), ნაწილი II, გვ. 35-36.
http://www.energyonline.ge/2020/ENERGY_MPPE2020_4_96_2020_2.pdf
3. Ramin Chikhladze, Ketevan Chikhladze, Zurab Janiashvili. „Influence of impurities on the properties of new transformer oil. TOKYO SUMMIT-IV, Proceedings Book of 4th international conference on innovative studies of contemporary sciences. July 29-31, 2021, Tokyo, Japan. pp.150-154.
https://www.tokyosummit.org/_files/ugd/614b1f_ffb6acf1d1b14e04a1082b34aee18b5d.pdf
4. ჩიხლაძე რ., ჩიხლაძე ქ., ჯანიაშვილი ზ., გაბოშვილი ჯ. ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის დიაგნოსტიკა წინაღობის სიდიდით. „ენერჯია“, 2021, №4(100), გვ. 57-62.
[http://www.energyonline.ge/j_2021/geo/4\(100\).pdf](http://www.energyonline.ge/j_2021/geo/4(100).pdf)
5. ჩიხლაძე რ., ჩიხლაძე ქ., ჯანიაშვილი ზ. მაღალი ძაბვის ძრავის საიზოლაციო სისტემის წინაღობის დამოკიდებულება ძაბვის მოქმედების ხანგრძლივობაზე. „ენერჯია“, 2022, №1(101), გვ. 42-46.
http://www.energyonline.ge/index.php?option=com_content&view=article&id=251%3Ascientific-and-technical-journal-energy-2021&catid=42%3Ascience-and-technology&Itemid=181&lang=ka

Abstract

The paper is dedicated to the diagnostics of the insulation system of high voltage installations. In particular, diagnostics by resistance of the insulation system, both for liquid insulation material - transformer oil, as well as for composite solid insulation materials, electric motor insulation system and oil-filled high-voltage transformer, where the insulation system is coated with transformer oil (electric oil) Represents.

The introduction shows the advantages of the method of diagnosing the insulation system according to the impedance compared to the diagnostic method according to the magnitude of the dielectric losses. It has also been shown that the degree of diagnostics of an insulation system with dielectric losses is greatly increased if we use magnitude of resistance of the insulation system.

After study of literature, there has been shown that there is not method by which a transformer is prepared for operation, or is in operation, or is not suitable for operation, by determining the oil's own impedance when oil temperature rises and then oil cools, because water diluted or bond in the transformer oil evaporates from it, so oil resistance at the same temperature will be greater when cooled than while heating.

For the purposes set out above, a review of the literature was conducted which failed to reveal any substantial results in both old and new works that either refuted or reinforced the above view. But it turned out that the study for this purpose is to some extent a continuation of the research conducted by previous doctoral students (G. Guraspashvili, K. Chikhladze, G. Vakhtangadze).

Determination of the resistance of the insulation system by the action of constant voltage is not a damaging method of insulation (unlike the elevated voltage test) and does not cause any defects that develop during operation.

The first chapter describes the tools and machines designed to measure the transformer's impedance in the temperature range of 20°C to 120°C. It is substantiated to limit the maximum measurement temperature to 120°C and to start the aging mechanism of the transformer oil at this temperature, in which case it would be impossible to determine the cause of the change in the specific impedance.

In terms of determining the resistance of the insulation system, materials used to build the insulation system of high voltage transformers, generators and motors and the structures created with these materials, the methods of measuring the resistance of these structures, the rules and the tools used are discussed.

Influence of the transformer oil and electrical paper aging products and water molecules formed during the aging process on the magnitude of the insulation system resistance are shown.

The effect of free radicals resulting from aging on the resistance of the oil-barrier system is discussed.

The third chapter discusses the dependence of the transformer on the new, regenerated, normal operating condition and dependence of the oil electrical resistivity corresponding to the limit permissible norm on the temperature, both as the temperature increases and as the temperature decreases. The values of the resistances measured by these two methods at the same temperature are compared. The ratio of these impedances

is determined. It has been shown that the higher this ratio, the aging it is and transformer oil contains more impurities.

The fourth chapter points out the principle of operation, scheme and software capability of the high-voltage machine insulation resistance measuring devices filled with transformer oil. Advantages and disadvantages of traditional and zoning methods for measuring insulation system characteristics are described.

Also, a diagram of replacement of the impedance of the insulation system of a two-winding transformer is given, and through this diagram, formulas are derived, which allows the traditional method of calculating the characteristics of a particular zone and vice versa.

In order to increase the accuracy of the measurement, it was necessary to shorten the windings after each measurement and to connect them electrically to the ground.

The experimental part of the fourth chapter discusses and compares the assessment of the condition of the insulation system with the absorption coefficient and the polarization index. The advantage of the polarization index over the absorption coefficient is also shown. In order to increase informativeness of the obtained results, the need to increase measurement time was identified.

The results show that the diagnostics of the insulation system of high voltage devices gives better results in terms of the magnitude of the resistance than the diagnostic of dielectric losses, and in some cases, reveals defects which in the case of dielectric losses will not be detected at all.

It is established that if we determine electrical resistivity of the transformer oil when the oil is heated and cooled to the same temperature, then we can estimate the condition of the oil by the ratio of the impedances.

The results obtained are recommended for practical use.