

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ქეთევან ჩიხლაძე

ზეთის დაძველების პროდუქტების გავლენა ტრანსფორმატორის
ახალი ზეთის თვისებებზე

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარმოდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2014 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ელექტროენერგეტიკის და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტის ელექტროენერგის წარმოების, გადაცემის და განაწილების მიმართულებაზე

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: სტუ–ს ელექტროენერგეტიკისა და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტის

პროფესორი: შალვა ნაჭყებია

რეცენზენტები:

1. სტუ–ს ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტის

პროფესორი: თენგიზ მუსელიანი

2. შპს „ენერგეტიკოსის“ დირექტორი

აკადემიური დოქტორი: ვახტანგ გიორგობიანი

დაცვა შედგება 2014 წლის „————“ —————, ————— საათზე საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი VIII, აუდიტორია №806. მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ–ს ბიბლიოთეკაში, ხოლო ავტორეფერატისა – სტუ–ს ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი

სრული პროფესორი

/გ. ხელიძე/

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.

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

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

დაძველების პროდუქტები ზეთის მახასიათებლების გაუარესებას იწვევს. როდესაც მახასიათებლის მნიშვნელობები ზეთის საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნებს არ აკმაყოფილებს ზეთს აღდგენას – რეგენერაციას უტარებენ, ხოლო ძლიერ დაძველებულ ზეთს, ახლით 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 შეღწეულის 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 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.

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 დაძველების პროდუქტებით არის გამოწვეული.

ლიტერატურაში არ მოიპოვება ინფორმაცია, რა გავლენას ახდენს ახალი ან რეგენირებული ზეთის თვისებებზე ზეთის დაძველების პროდუქტები.

ამ საკითხის გადაწყვეტა, როგორც მეცნიერული ისე პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით აქტუალურია. მიღებული შედეგები

საშუალებას მოგვცემს შევაფასოთ გარემონტებულ მოწყობილობაში ახალი, ძვირადღირებული ზეთი გამოვიყენოთ თუ რეგენირებული.

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

აღსანიშნავია, რომ დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდით ახალი ან რეგენირებული ზეთის ყველა მახასიათებლის გაუარესება ერთდროულად ხდებოდა, ე.ი. ზეთის დაძველების 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“.

პუბლიკაციები. დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია ხუთი სტატია რეცენზირებად და რეფერირებად სამეცნიერო ჟურნალებში.

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

თავი 1. ამოცანის დასმა

1.1. მინარევები ტრანსფორმატორის ზეთში

ტრანსფორმატორის ზეთში მყოფ ყველა ნივთიერებას, რომელიც ზეთის თვისებების გაუარესებას იწვევს ტრანსფორმატორის ზეთის მინარევებს უწოდებენ. მათი კლასიფიკაცია წარმოშობის და აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით წარმოებს.

წარმოშობის მიხედვით მინარევები შეიძლება იყოს ზეთის მიღების ტექნოლოგიით განპირობებული ან 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.

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.

ტრანსფორმატორის ზეთში გახსნილ აირებს ძირითადად ჰაერი მიეკუთვნება, რომელიც თავისუფალი სუნთქვის მქონე ელექტრომოწყობილობაში და ჰერმეტიკულ მოწყობილობებში ჰერმეტიზაციის დარღვევის შემთხვევაში ატმოსფეროდან აღწევს.

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 ტენშემცველობას უწოდებენ და მას ერთ ტონა ზეთში გახსნილი წყლის გრამებში გამოსახული რაოდენობით (გრ H_2O ტონა ზეთში) გამოსახავენ.

ტრანსფორმატორის ზეთში მყარ მინარევებს ისეთი მინარევები მიეკუთვნება, რომლებიც ზეთში არ იხსნებიან, თუ მათი სიმკვრივე ტრანსფორმატორის ზეთის სიმკვრივის ტოლია, მაშინ ისინი ზეთში შეტივტივებული არიან, ხოლო მეტი სიმკვრივის ნაწილაკები ავზის ძირზე და აქტიური ნაწილაკების ზედაპირზე შლამის სახით დაილექებიან. მათ ლიტერატურაში მექანიკურ მინარევებს უწოდებენ.

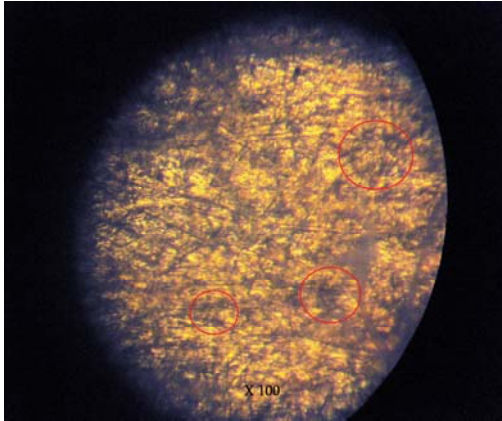
დაძველების შედეგად წარმოქმნილი მყარი პროდუქტები, როგორცაა ზეთში უხსნადი მეტალორგანული შენაერთები, ფისები და სხვა. შლამის სახით (ნახ. 1) ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ზედაპირთან კოვალენტურ კავშირს ამყარებენ და ნაწილობრივი განმუხტვების განვითარების ხელსაყრელ პირობებს ქმნიან. ისინი მყარი იზოლაციის მოცულობაშიც აღწევს (ნახ. 2) და მისი ელექტროსაიზოლაციო თვისებების მნიშვნელოვან გაუარესებას იწვევენ.

დაძველების პროდუქტები მნიშვნელოვნად ცვლის ზეთის ფიზიკურ, ელექტრულ და ქიმიურ მახასიათებლებს. ამ მოვლენის მაჩვენებელია საექსპლუატაციო ზეთის ფერის მნიშვნელოვანი ცვლილება (ნახ. 3).

ბოლო წლებში ჩვენი ქვეყნის ენერგოსისტემაში მაღალი ძაბვის მოწყობილობების რემონტი ინტენსიურად მიმდინარეობს. უმეტესი მათგანის ზეთის რეგენერაცია პრაქტიკულად შეუძლებელია და რემონტის შემდეგ ახალი ზეთები გამოიყენება.



ნახ. 1. მყარი მინარევები ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის ზედაპირზე



ნახ. 2. მყარი იზოლაციის მოცულობაში შეღწეული ზეთის დაძველების პროდუქტები



ნახ. 3. დაძველების შედეგად ზეთის ფერის ცვლილება. ა- ახალი, ბ- სუსტად და გ- ძლიერ დაძველებული

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

1.2. ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველებით წარმოქმნილი მინარევები

ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველება მასზე ტემპერატურის, ელექტრული ველის და მეტალების კატალიზატორული მოქმედებით მიმდინარეობს. წყალი და ჟანგბადი დაძველების პროცესს უფრო აჩქარებს. ჟანგბადი რეაქციაში შედის ზეთის მოეკულებთან და დიპოლურ მოლეკულებს წარმოქმნის. ეს მოვლენა ზეთის დაჟანგვის სახელით არის ცნობილი.

დაძველების პროცესში მცირდება ზეთის გამრღვევი ძაბვა და კუთრი წინაღობა. იზრდება დიელექტრიკული დანაკარგები და შეღწევადობა. ასევე იზრდება სიმკვრივე, გარდატეხის და ვერმანის კოეფიციენტები და ზეთის ფერი უფრო მუქი ხდება, ხოლო ზედაპირული დაჭიმულობა მცირდება.

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

დაძველებით წარმოქმნილი ზეთში უხსნადი მყარი ნაწილაკები მექანიკური მინარევების რაოდენობას ზრდიან.

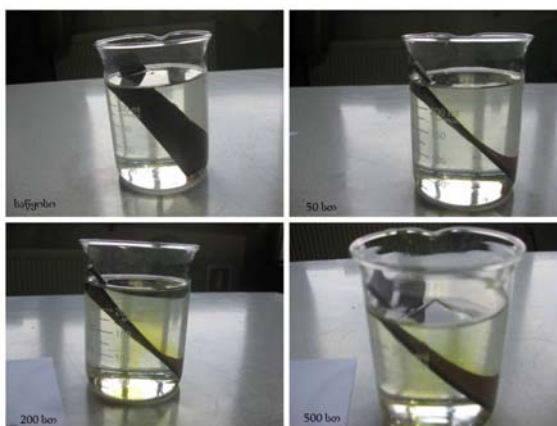
ჟანგბადის არყოფნისას დაჟანგვის პროცესი პრაქტიკულად არ მიმდინარეობს, მაგრამ ჟანგბადი მყარი იზოლაციის დაძველების შედეგად გამოიყოფა. ამგვარად ტრანსფორმატორის ზეთში ჟანგბადი ყოველთვის არსებობს. ზეთის დაჟანგვის პროცესში ნაწილობრივ წყლის ჟანგბადი მონაწილეობს. ამდაგვარად დაჟანგვის პროცესიც ზეთის ექსპლუატაციის მახასიათებელი მოვლენაა და რამოდენიმე ეტაპად მიმდინარეობს.

ტრანსფორმატორის ზეთის დაჟანგვის საწყის პერიოდს საინკუბაციო პერიოდს უწოდებენ. ამ დროს ზეთის მოლეკულებს ჟანგბადი უკავშირდება, მაგრამ დაძველების პროდუქტები არ გამოიყოფა.

შემდგომ ეტაპზე ზეთში დაჟანგვის მდგრადი პროდუქტები წარმოქმნება, როგორებიცაა ორგანული მჟავები, ტუტეები და ზეჟანგები, წყალი, შლამი, ნალექი და ზეთში უხსნადი სხვა პროდუქტები. მას ძირითად პერიოდს უწოდებენ. ამ ეტაპზე დაჟანგვის პროდუქტები მაქსიმალურად წარმოიქმნება, მაგრამ მცირე ზომების ისინი ზეთში შეტივტივებული არიან და ნალექი ნაკლებად გამოიყოფა.

ბოლო პერიოდში დაჟანგვის ინტენსივობა ნაკლებია. ძირითად პერიოდში წარმოქმნილი მცირე ზომის ნაწილაკები ერთმანეთთან კოვალენტურ კავშირს ამყარებს და ნალექი ინტენსიურად გამოიყოფა.

ახალი ან რეგენირებული ზეთის გარემონტებულ ელექტრომოწყობილობაში ჩასხმისას, მყარ იზოლაციაში და აქტიური ნაწილის ზედაპირზე დარჩენილი ზეთის დაძველების პროდუქტები დიფუზიის და ზეთის მოძრაობით თანდათან იხსნება.



ნახ. 4. ტრანსფორმატორის ახალ ზეთში მყარი იზოლაციიდან მინარევების გახსნა

ნახ. 4.-ზე ნაჩვენებია ტრანსფორმატორის ახალ ზეთში მინარევების გახსნის პროცესის მიმდინარეობა $80 \pm 5^\circ\text{C}$ ტემპერატურაზე, ამისთვის დაძველებული ზეთიანი ტრანსფორმატორიდან ბარიერული იზოლაციის ნაჭერი ავიღეთ, ახალი ზეთით გავრცხეთ და შემდეგ ახალ ზეთში მოვათავსეთ. პირველ ეტაპზე (50სთ) მინარევების გახსნა ნელი ტემპით მიმდინარეობს და ზეთის ფერი არ იცვლება. მეორე ეტაპზე (500სთ) ზედაპირთან ახლოს მყოფი მინარევები კავშირს ამყარებენ ზეთის მოლეკულებთან და გახსნის სიჩქარე იზრდება. ზეთის ფერი იცვლება.

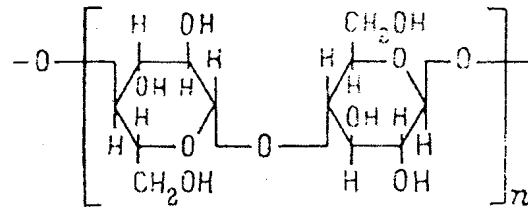
500 საათის განმავლობაში ზეთის ფერი უმნიშვნელოდ შეიცვალა, მაგრამ ეს მარტივი ცდა აჩვენებს, რომ მინარევების მყარი იზოლაციის მოცულობიდან ზეთში გახსნა გარკვეულ დროს საჭიროებს, ხოლო აქტიური ნაწილის ზედაპირზე მყოფი მინარევები შედარებით ადრე იხსნებიან.

1.3. ელექტროტექნიკური ქაღალდის დაძველებით წარმოქმნილი მინარევები

მაღალი ძაბვის ზეთით შევსებული მოწყობილობების მყარ იზოლაციას ელექტროტექნიკური ქაღალდი და მუყაო წარმოადგენს, რომლებიც მერქნის გადამუშავების ბოჭკოვანი მასალა ცელულოზაა. 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.

გლუკოზური ჯგუფი არასიმეტრიული დიპოლური სტრუქტურისაა, ისინი ერთმანეთთან კავშირის დამყარებისას სივრცეში საწინააღმდეგო ორიენტაციას იკავებენ (ნახ. 5.).



ნახ. 5. ცელულოზის მოლეკულის სტრუქტურული ფორმულა

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

თავი 2. ტრანსფორმატორის ზეთის პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდები

2.1. ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრული მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდები

1. ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდე სტანდარტულ ელექტროდებს შორის 2.5მმ მანძილის მქონე შუალედში სერიული ხელსაწყოს АИМ-90 საშუალებით წარმოებდა. მიღებული შედეგებისთვის ისაზღვრებოდა საშუალო კვადრატული გადახრა და ვარიაციის კოეფიციენტი. ხელსაწყო წინასწარ შემოწმებული იყო და ცდების მიმდინარეობისას პერიოდული შემოწმება–კალიბრება უტარდებოდა. სტანდარტის მოთხოვნის მიხედვით გამრღვევი ძაბვის სიდიდე ქვსი ცდის საშუალო მნიშვნელობაა მიღებული. ამასთანავე, საშუალო კვადრატული გადახრა 3 კილოვოლტს, ხოლო ვარიაციის კოეფიციენტი 3% არ აღემატებოდა.

2. ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობა სტანდარტული ზომების მქონე უჯრედში მუდმივ ძაბვაზე, სხვადასხვა ტემპერატურაზე ტერაომეტრით ისაზღვრებოდა. ერთიდაიმავე ტემპერატურაზე ორი ცდა ტარდებოდა და ორი ცდის შედეგი ერთმანეთისგან 35% მეტად არ უნდა განსხვავდებოდეს. სტანდარტის თანახმად, ამ ორი ცდის შედეგიდან უდიდესი შედეგი ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის მნიშვნელობად ითვლება.

3. ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგები სტანდარტული ზომების მქონე გამზომი უჯრედის საშუალებით 50 ჰერც სიხშირეზე, სხვადასხვა ტემპერატურაზე, ცვლადი ძაბვის ბოგირით *P 5026 M* საშუალებით ისაზღვრებოდა. გაზომვისას მაღალძაბვიან ელექტროდსა და გამზომ ელექტროდს შორის ველის დაძაბულობა 1 კილოვოლტი იყო 1 მეტრზე, რაც სტანდარტის ძირითადი მოთხოვნაა.

ყოველ ტემპერატურაზე ორი პარალელური ცდა ტარდებოდა. ორი ცდის შედეგი ერთმანეთისგან 15% მეტად არ უნდა განსხვავდებოდეს და გაზომვის შედეგად ამ ორი მნიშვნელობიდან უმცირესი ითვლება.

3. ტრანსფორმატორის ზეთის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის განსაზღვრა დიელექტრიკული დანაკარგების პარალელურად ცვლადი ძაბვის ბოგირით ხდება. მაგრამ განსაზღვრის სიზუსტე უფრო მაღალია, კერძოდ ორი ცდის შედეგი ერთმანეთისგან 5% მეტად არ უნდა განსხვავდებოდეს და გაზომვის შედეგს ორი ცდის საშუალო არითმეტიკული წარმოადგენს.

ყველა ცდაში ტემპერატურა სტანდარტის მიხედვით $\pm 2^{\circ}C$ სიზუსტით იზომება და მახასიათებლის გაზომვა ტემპერატურის დამყარებიდან 10 წუთის შემდეგ წარმოებდა

ზემოთ ჩამოთვლილი მახასიათებლები 20, 50, 70 და $90^{\circ}C$ ტემპერატურაზე გაიზომა.

2.2. ტრანსფორმატორის ზეთში მექანიკური

მინარევების განსაზღვრა

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

მისი საშუალებით 100სმ^3 მოცულობის ზეთში მყარი (მექანიკური) ნაწილაკების ჯამური რაოდენობა განისაზღვრება, რომელთა გეომეტრიული ზომები 2,5 მიკრომეტრიდან 500 მიკრომეტრამდეა. შემდეგ მას ანალიზატორი სხვადასხვა ზომის (დიაპაზონის) მიხედვით ყოფს. (ცხრ. 1)

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

ცხრილი 1. ტრანსფორმატორის ზეთში მექანიკური მინარეგების 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

კლასის დადგენა ჩვენთან მოქმედი სტანდარტით და საზღვარგარეთის სტანდარტებით (ISO4406, NAS1638) ამ ზომის მექანე ნაწილაკების რაოდენობის მიხედვით წარმოებს (ცხრ. 2).

ცხრილი 2. 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 _A	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)

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. შესაძლებელია ავარია. როდესაც მექანიკური ნაწილაკების რაოდენობა 250000 აღემატება, მაშინ მინარევებით გამოწვეული ავარიის ალბათობა მაღალია. ასეთი ზეთის ექსპლუატაცია არ შეიძლება

2.3. ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობის და გარდატეხის მაჩვენებლის განსაზღვრა

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

ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა წინასწარ ცნობილი ზედაპირული დაჭიმულობის მქონე სითხის (გამოხდილი წყალი) წვეთების რაოდენობების ჰაერში და გამოსაკვლევ სითხეში ფარდობით განისაზღვრება. ამისათვის ცნობილი უნდა იყოს მოცემულ ტემპერატურაზე გამოხდილი წყლის სიმკვრივე და ზედაპირული დაჭიმულობა. გამოსაკვლევი ზეთის სიმკვრივე ცდით უნდა გაიზომოს, ხოლო

გამოხდილი წყლის სიმკვრივის და ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდეები სპეციალური ცხრილებიდან აიღება.

სინათლის სხივის ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას სხივის დაცემის და გარდატეხის კუთხეები იცვლება. 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.

გარდატეხის მაჩვენებლის განსაზღვრა ИРФ-454 БМ ტიპის რეფრაქტომეტრით ხდება, რომლის დანიშნულებაცაა სითხეების გარდატეხის მაჩვენებელი n უშუალოდ განსაზღვრა გამოსხივების D სპექტრში.

გამოსაკვლევი ზეთის გარდატეხის მაჩვენებლის სიდიდე იანგარიშება, როგორც სამი გაზომილი სიდიდის საშუალო არითმეტიკული. თუ გაზომვა $20^{\circ}C$ –დან განსხვავებულ ტემპერატურაზე მოხდა. მაშინ n_t სიდიდე $20^{\circ}C$ შემდეგი ფორმულით მიიყვანება:

$$n_{20} = n_t + \alpha(t - 20), \quad (1)$$

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

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. გამოირჩევა მაღალი სტაბილურობით და მომზადებულია ელექტრომოწყობილობაში ჩასასხმელად.

2. ბაქოს ნავთობგადამამუშავებელი ქარხნის „*Азербейнефть*“ მიერ წარმოებული *T-1500* მარკის ტრანსფორმატორის ახალი ზეთი რუსული სტანდარტების მიხედვით არის წარმოებული და ჩვენთან ფართოდ გამოიყენება. მისი მახასიათებლები საერთაშორისო სტანდარტებს აკმაყოფილებს და ფილტრაციის დეგაზაციის და შრობის შემდეგ მისი გამოყენება მაღალი ძაბვის მოწყობილობებში შეიძლება.

3. ენერგოსისტემებში ზეთით შევსებულ ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში ექსპლუატაციაში უმეტესად *T-1500* მარკის ზეთი გამოიყენება. ამის გამო, ცდები ამ მარკის რეგენირებულ ზეთზე ჩატარდა. ის რეგენირებული ზეთის მოთხოვნებს აკმაყოფილებდა და თავისი მახასიათებლებით ახლოს იყო *T-1500* მარკის საექსპლუატაციოდ მომზადებულ ახალ ზეთთან.

ცდისთვის მომზადებულ ახალი და რეგენირებული ზეთების მახასიათებლები საწყის მდგომარეობაში თითქმის მსგავსია და აკმაყოფილებს ელექტრომოწყობილობაში ჩასასხმელად მომზადებული ახალი და რეგენირებული ზეთის ნორმის მოთხოვნებს.

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.

ცხრ. 3. ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტების მახასიათებლები

№	მახასიათებლები	განზომილება	შედეგი
1	ტენშემცველობა	ppm	10.1
	მჟავური რიცხვი	$\frac{\text{მგრKOH}}{\text{გრზეთზე}}$	0.32
	წყალში ხსნადი მჟავების და ტუტეები	$\frac{\text{მგრKOH}}{\text{გრზეთზე}}$	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	

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).

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.

3.3 გრაფიტის ნაწილაკების მომზადება

ტრანსფორმატორის ზეთში ნაწილობრივი გარღვევის მიმდინარეობისას ადგილი აქვს ზეთის მოლეკულების დაშლას, რის შედეგად თავისუფალი გრაფიტი გამოიყოფა, რომელიც საგრძნობ გავლენას ზეთის ელექტრულ მახასიათებლებზე ახდენს.

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

ზეთის დაძველების პროდუქტებიდან გრაფიტის გამოყოფა პრაქტიკულად შეუძლებელი იყო, ამის გამო ზეთის თვისებებზე გრაფიტის ნაწილაკების გავლენის შესწავლის მიზნით გრაფიტის მტვერი ელექტროტექნიკური ნახშირისგან დამზადდა, რომელიც 70 მიკრონის უჯრედების მქონე მეტალის საცერში გატარდა, რის შედეგად დიდი ზომის ნაწილაკების რაოდენობა მინიმუმამდე შემცირდა, ეს კი რეალურ მდგომარეობას შეესაბამება.

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.

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 ცხრილში №4.

ცხრილი 4. ცდებში გამოყენებული ზეთების საწყისი მახასიათებლები

№	მახასიათებლები	განზომი- ლება	T-1500 ახალი	T-1500 რეგენი- რებული	Nytro 11GX	ნორმა	
						ახალი	საექს- პლუა- ტაციო
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 კოე- ფიციენტი (20°C)	–	1,4738	1,4751	1,4748	–	<1,5
5.	სტრუქტურა C _A C _P C _N	%	12,5 47,7 39,8	12,5 47,7 39,8	2,6 53,2 44,3	– – –	– – –
6.	მჟავური რიცხვი	მგKOH/1გრ	0,0035	0,004	<0,001	0,1	0,25
7.	ტენზემცველობა	ppm	10	10,1	9,2	≤10	25
8.	გამრღვევი ძაბვა	კვ	66	64	68	>60	35
9.	დიელექტრიკულ ი დანაკარგები tgδ (90°C)	%	0,35	0,4	0,04	<0,5	1,5
10.	კუთრი წინაღობა 90°C	10 ¹⁰ ომი.მ	75	67	115	–	–
11.	მექანიკური მინარევები	კლასი	X	IX	IX	XI	XIII

სამივე ზეთი აკმაყოფილებს საექსპლუატაციოდ მომზადებული ზეთის ნორმის მოთხოვნებს და რეკომენდებულია ექსპლუატაციისათვის.

საკვლევ ზეთში დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდა ზეთის ფერის მნიშვნელოვან ცვლილებას იწვევდა (ნახ. 6), მაგრამ ზეთის ტენშემცველობა უცვლელი იყო, რადგან მინარევები წინასწარ შრებოდა.

დაძველების პროდუქტები მაღალი მჟავური რიცხვით ხასიათდებიან, მაგრამ ზეთის მასასთან შედარებით (1000გრ) გახსნილი მინარევების რაოდენობა (7გრ) მცირე რაოდენობის იყო და საკვლევ ზეთების მჟავური რიცხვი 2%-ზე მეტად არ იზრდებოდა, რაც მიღებულ შედეგებზე მჟავური რიცხვის გავლენას გამორიცხავდა.

ნახშირბადის ნაწილაკების მინარევების გავლენის შესაფასებლად ახალი ზეთის თვისებებზე ცდებში გამოყენებული იყო ელექტროტექნიკური გრაფიტის ფხვნილი, რომელიც ზეთის ფერის ცვლილებას იწვევდა (ნახ. 7), მაგრამ გრაფიტით გამოწვეული ფერის ცვლილება უფრო ნაკლები იყო, ვიდრე დაძველებით წარმოქმნილი მინარევებით.

რადგან სტანდარტით მიღებულია, რომ ტრანსფორმატორის ზეთის სისუფთავის კლასი შეფასდეს 100სმ³ ზეთში გახსნილი მინარევების იმ რაოდენობით, რომელთა გეომეტრიული ზომები 5–დან 15 მიკრომეტრამდეა ამ ზომის ნაწილაკები, ნაწილაკების მთვლელი ფოტოანალიზატორის მეორე არხში ხვდება და მას შესაბამისად N_2 აღნიშნავენ, მაგრამ მინარევების გავლენის შეფასების მიზნით, აგრეთვე, საინტერესო იყო მინარევების საერთო (ჯამური) რაოდენობა ($N_{\text{ჯამი}}$).



ნახ. 6. დაძველების პროდუქტებით ტრანსფორმატორის ზეთის ფერის ცვლილება. 1 – Nytro და 2 – T-1500



ნახ. 7. გრაფიტის ნაწილაკებით ტრანსფორმატორის ზეთის ფერის ცვლილება. 1 – Nytro და 2 – T-1500

N_2 და $N_{\text{ჰამო}}$ შორის დამოკიდებულება არსებობს. $N_{\text{ჰამო}}$ გაზრდა ყოველთვის იწვევს N_2 გაზრდას, ამის გამო 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. 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 დაძველების პროდუქტები ზეთში თანაბრად არის განაწილებული.

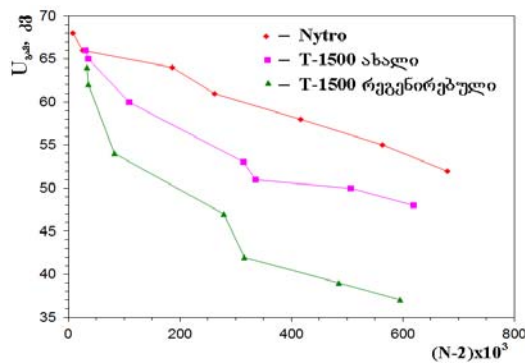
დაძველების პროდუქტების რაოდენობის გაზრდით სამივე სახის ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდე მცირდება, მაგრამ თუ *Nytro* მარკის ზეთში $U_{\text{გამ}}$ შემცირდება N_2 გაზრდით თითქმის სწორხაზოვანია, $T-1500$ მარკის ახალი და დაძველებული ზეთებისთვის ამ დამოკიდებულების ექსპონენციალური სახე აქვს (ნახ. 8). ამასთანავე, შემცირება უფრო $T-1500$ მარკის რეგენირებულ ზეთშია გამოხატული.

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.

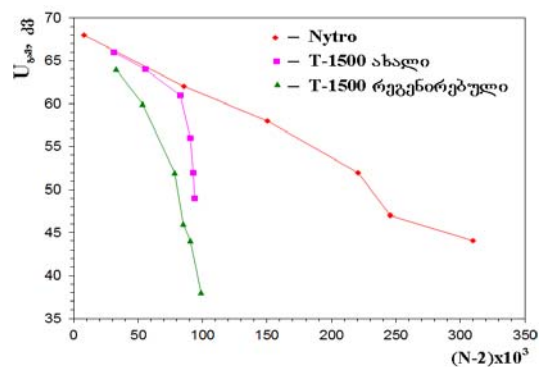
თუ ამ რაოდენობის მინარეული ნაწილაკებით შევაფასებთ საკვლევი ზეთის გამრღვევი ძაბვის ცვლილება აღმოჩნდება, რომ *Nytro* მარკის ზეთში გამრღვევი ძაბვის შემცირება 12% არ აღემატება, ხოლო $T-1500$ მარკის ახალ და რეგენირებულ ზეთებისთვის შემცირება შესაბამისად 25% და 36%

შეადგენს, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ ახალი ზეთების $U_{გამ}$ უფრო ნაკლებად არის დამოკიდებული ზეთის დაძველების პროდუქტების რაოდენობაზე, ვიდრე რეგენირებული ზეთის.

გამრღვევი ძაბვის გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე დამოკიდებულებიდან ჩანს (ნახ. 9), რომ *Nytro* მარკის ზეთში, მსგავსად ზეთის დაძველების პროდუქტების ნაწილაკებისა, გრაფიტის ნაწილაკების რიცხვის გაზრდით გამრღვევი ძაბვის სიდიდე სწორხაზოვნად მცირდება, მაგრამ იმავე სიდიდემდე შესამცირებლად, რაც ზეთის დაძველების პროდუქტების შემთხვევაში იყო, თითქმის ორჯერ ნაკლები რაოდენობის გრაფიტის ნაწილაკია საჭირო, ხოლო *T-1500* მარკის ახალი და რეგენირებული ზეთებისთვის კი ექვსჯერ ნაკლები.



ნახ. 8 ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევიძაბვის დამოკიდებულება დაძველების პროდუქტების მყარი ნაწილაკების რაოდენობაზე



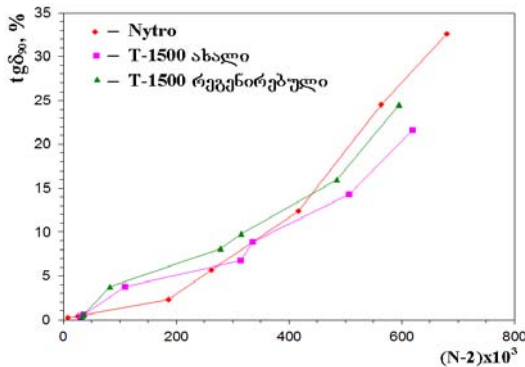
ნახ. 9. ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევი ძაბვის დამოკიდებულება გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე

T-1500 მარკის ახალ და რეგენირებულ ზეთებისთვის შესაბამისად გრაფიტის ნაწილაკების 80000 და 60000 რაოდენობისას $U_{გამ}$ შემცირება მნიშვნელოვანია.

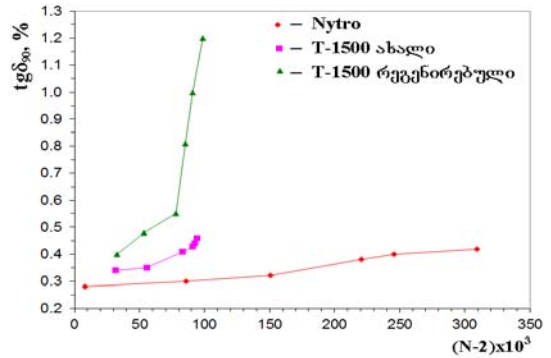
ყველა სახის ზეთების $U_{გამ}$ სიდიდეზე გრაფიტის ნაწილაკების გავლენა უფრო ძლიერად არის გამოხატული, ვიდრე ზეთის დაძველების პროდუქტების, მაგრამ *T-1500* მარკის ზეთებისთვის ეს გავლენა თითქმის სამჯერ უფრო ძლიერია, ვიდრე *Nytro* მარკის ზეთისთვის.

4.3 ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთების დიელექტრიკული დანაკარგების დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე

ტრანსფორმატორის ზეთის დამველების პროდუქტების მინარევები მნიშვნელოვნად ზრდიან, როგორც ახალი, ისე რეგენირებული ზეთების დიელექტრიკული დანაკარგებს, რაც მეტია ზეთის ტემპერატურა, მით მეტია ეს ცვლილება, მაგრამ სტანდარტი ითხოვს, რომ ზეთის ხარისხი შეფასდეს დიელექტრიკული დანაკარგების იმ მნიშვნელობით, რომლებიც $90^{\circ}C$ ტემპერატურაზეა განსაზღვრული – $tg\delta_{90}$, ხოლო ზეთის სისუფთავის შესაფასებლად ნაწილაკების N_2 რაოდენობა გამოიყენება.



ნახ.10. $90^{\circ}C$ ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების დამოკიდებულება ზეთის დამველების პროდუქტების მყარი ნაწილაკების რაოდენობაზე

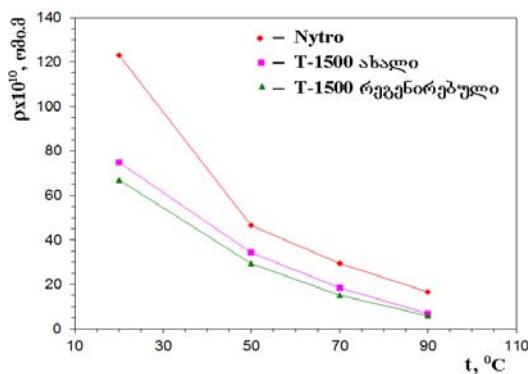


ნახ. 11. $90^{\circ}C$ ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების დამოკიდებულება გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე

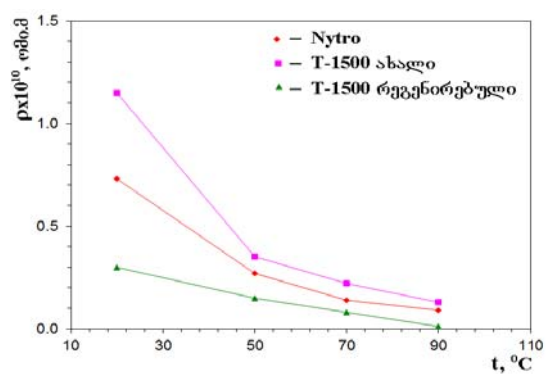
სამივე სახის ზეთებისთვის $tg\delta_{90}$ დამოკიდებულებას მინარევების რაოდენობაზე ზოგადად ექსპონენციალური სახე აქვს (ნახ. 9). თუ ნაწილაკების რიცხვი 300000-ზე ნაკლებია, ე.ი. მცირედ აღემატება სისუფთავის XIII კლასის ზედა ზღვარს, მაშინ Nytro მარკის ზეთს უფრო ნაკლები დიელექტრიკული დანაკარგები აქვს, ვიდრე T – 1500 მარკის ახალ ან რეგენირებულ ზეთებს. ამასთანავე 300000 ნაწილაკებისთვის $tg\delta_{90}$ ზრდა Nytro მარკის ზეთისთვის 20, ხოლო T – 1500 მარკის ზეთებისთვის თითქმის 25 ტოლია.

როდესაც მინარევების რაოდენობა სისუფთავის ზღვარს აღემატება, მაშინ $tg\delta_{90}$ Nytro მარკის ზეთისთვის ზრდა უფრო მეტია, ვიდრე T-1500 მარკის ზეთებისთვის, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ Nytro მარკის ზეთი დაძველების პროდუქტების მიმართ სისუფთავის საექსპლუატაციო ზღვრამდე უფრო სტაბილურია, ვიდრე T-1500 მარკის ზეთები, ხოლო ზღვარს ზემოთ კი T-1500 მარკის ზეთი.

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



ნახ. 12. ტრანსფორმატორის ზეთების კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე მინარევების გახსნამდე



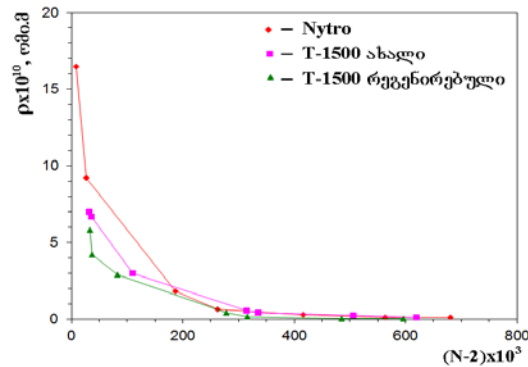
ნახ. 13. ტრანსფორმატორის ზეთების კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე მინარევების მაქსიმალური გახსნის შემდეგ

4.4 ტრანსფორმატორის ახალი და რეგენირებული ზეთების კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე

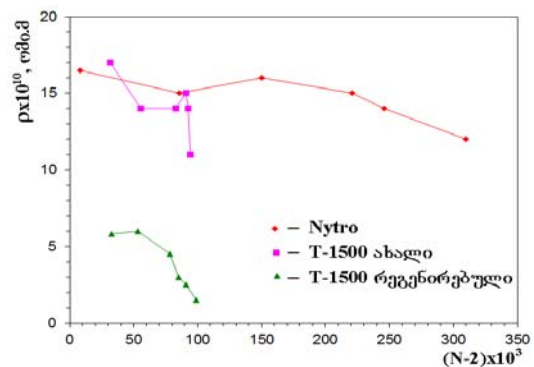
ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების პროდუქტების გავლენის შესასწავლად ახალი და რეგენირებული ზეთის კუთრი წინაღობის სიდიდეზე პირველ რიგში განსასაზღვრავი იყო თუ, როგორი სახის გამტარობას ჰქონდა ადგილი ტრანსფორმატორის ზეთში მინარევების

გახსნამდე და გახსნის შემდეგ. ამისთვის აგებული იყო კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება (ρ_{90}) ტემპერატურაზე ზეთში მინარევების გახსნამდე და მაქსიმალური გახსნის შემდეგ. ამასთან ერთად შეფასდა ρ შემცირების კოეფიციენტი ტემპერატურის $70^{\circ}C$ –ით გაზრდისას.

ამ დამოკიდებულების გრაფიკები (ნახ.12,13) 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 დაძველების პროდუქტების გახსნა ელექტროგამტარობის სახეს არ ცვლის.



ნახ. 14. $90^{\circ}C$ ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება ზეთის დაძველების პროდუქტების მყარი ნაწილაკების რაოდენობაზე



ნახ. 15. $90^{\circ}C$ ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის დამოკიდებულება გრაფიტის ნაწილაკების რაოდენობაზე

$90^{\circ}C$ ტემპერატურაზე ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინაღობის (ρ_{90}) დამოკიდებულების მრუდს N_2 რაოდენობაზე სამივე სახის ზეთისთვის ექსპონენციალური სახე აქვს (ნახ.14) და ზეთის სისუფთავის XIII კლასის საზღვრამდეა *Nytro 11GX* მარკის ზეთს ρ_{90} უფრო მეტი მნიშვნელობა გააჩნია, ვიდრე სხვა ზეთებს, მაგრამ ნაწილაკების რიცხვის გაზრდით ρ_{90} სიდიდე მნიშვნელოვნად მცირდება და სისუფთავის ზედა ზღვარზე (250000 ნაწილაკი) სამივე სახის ზეთს კუთრი წინაღობის ტოლი

მნიშვნელობა აქვს. ასეთივე კანონზომიერებას ადგილი აქვს 20, 50 და 70° C ტემპერატურაზე.

გრაფიტის ნაწილაკების გახსნა (ნახ.15) სამივე სახის ზეთში ნიშნელოვნად ცვლის აღნიშნული დამოკიდებულების სახეს და ახალი ზეთებისთვის დამოკიდებულების მრუდზე მკვეთრად გამოხატული მაქსიმუმი შეიმჩნევა, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ გამტარებლობის სახე იცვლება.

4.5 ტრანსფორმატორის ზეთების ზედაპირული დაჭიმულობის და რეფრაქციის კოეფიციენტის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე

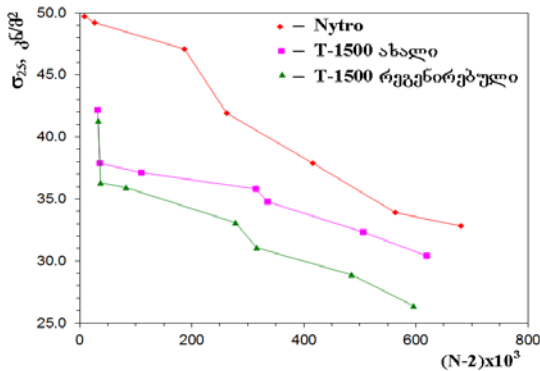
ტრანსფორმატორის ზეთის დამკველების პროდუქტები ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებებს შეიცავენ. ახალ ზეთში მათი გახსნით ზედაპირული დაჭიმულობის და რეფრაქციის კოეფიციენტის ცვლილებაა მოსალოდნელი.

ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების რაოდენობის გაზრდა ტრანსფორმატორის ზეთში ზედაპირული დაჭიმულობის σ_{25} შემცირებას იწვევს. ამასთანავე, უმნიშვნელოდ იზრდება რეფრაქციის კოეფიციენტი.

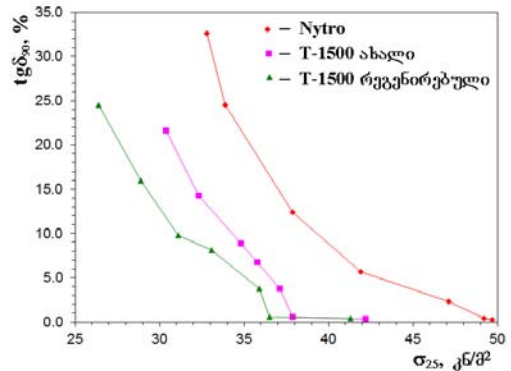
Nytro 11GX მარკის ახალი ზეთისთვის σ_{25} დამოკიდებულებას მინარევების რაოდენობაზე სწორხაზოვანი სახე აქვს (ნახ.16), ხოლო *T-1500* მარკის ახალი და რეგენირებული ზეთებისთვის სწორხაზოვანი დამოკიდებულებიდან გადახრა შეიმჩნევა.

ცნობილია, რომ ტრანსფორმატორის ზეთის დამკველებით ზეთის რეფრაქციის კოეფიციენტი იზრდება. სამივე სახის ზეთებისთვის მინარევების რაოდენობის გაზრდით რეფრაქციის კოეფიციენტი უმნიშვნელოდ იზრდება. მატება 2% არ აღემატება, ე.ი. მინარევები რეფრაქციის კოეფიციენტზე სგრძნობ გავლენას ვერ ახდენენ. ეს იმას ნიშნავს, რომ ზეთის დამკველების პროდუქტების გახსნით ზეთის სტრუქტურა არ იცვლება.

რადგან დიელექტრიკული დანაკარგები და ზედაპირული დაჭიმულობა ცალ-ცალკეა დამოკიდებული მინარევების რაოდენობასთან, მაშინ შეგვიძლია დავადგინოთ დამოკიდებულება ტრანსფორმატორის ზეთის σ_{25} და tgd_{90} შორის, როდესაც ტენშემცველობა, მჟავური რიცხვი, წყალში ხსნადი მჟავების და ტუტეების რაოდენობა და სტრუქტურული შემადგენლობა უცვლელია. ამ დამოკიდებულებას ექსპონენციალური სახე აქვს და ზედაპირული დაჭიმულობის შემცირებით დიელექტრიკული დანაკარგები სამივე სახის ზეთისთვის თითქმის სწორხაზოვნად იზრდება (ნახ. 17).



ნახ.16. ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობის დამოკიდებულება მინარევების რაოდენობაზე



ნახ.17. ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების tgd_{90} დამოკიდებულება ზედაპირულ დაჭიმულობაზე

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 მეტი გამრღვევი ძაბვა აქვს, ვიდრე *T-1500* მარკის ახალ ან რეგენირებულ ზეთებს.

4. სამივე სახის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების მნიშვნელობა 90°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.

გამოქვეყნებული ლიტერატურა

1. ჩიხლაძე რ., გურასპაშვილი გ., ჩიხლაძე ქ. ტრანსფორმატორის ზეთის ხარისხის შეფასება ν/ρ სიდიდით. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, 2012, №4 (486), გვ. 9–12.
2. ჩიხლაძე რ., გურასპაშვილი გ., ჩიხლაძე ქ. ტრანსფორმატორის ზეთის რეფრაქციის კოეფიციენტსა და სიმკვრივეს შორის კავშირი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები, 2012, №4 (486), გვ. 13-15.
3. ჩიხლაძე რ., ჩიხლაძე ქ. მინარევების გავლენა ტრანსფორმატორის ახალი ზეთის თვისებებზე. ენერჯია 2013, №4 (86), გვ. 8–12.
4. ჩიხლაძე ქ. ტრანსფორმატორის ზეთის შეფასება რეფრაქციის კოეფიციენტის და სიმკვრივის ფარდობით. მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „ენერჯეტიკა რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“. 25–26 მაისი, ქუთაისი, 39–41 გვ.
5. Чихладзе Р.Г., Начкебия Ш.Ш., Чихладзе К.Р. Влияние продуктов старения масла на диэлектрические свойства свежих трансформаторных масел. XIII международная конференция „Физика диэлектриков, Диэлектрики 2014“. Санкт-Петербург, Россия, 2-6 Июня, 2014.

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 *Nytrol11GS* 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.

