

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გიორგი გურასპაშვილი

ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთების
პარამეტრებს შორის ურთიერთკავშირი

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: "ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია"

შიფრი: 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

თებერვალი, 2019 წ.

საავტორო უფლება © 2019 წელი, გიორგი გურასპაშვილი

თბილისი

2019 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გიორგი გურასპაშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთების პარამეტრებს შორის ურთიერთკავშირი“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

_____, 2019 წელი

ხელმძღვანელი: _____ პროფესორი რ. ჩიხლაძე

რეცენზენტი: _____

რეცენზენტი: _____

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2018

ავტორი: გურასპაშვილი გიორგი

თემის დასახელება: „ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთების
პარამეტრებს შორის ურთიერთკავშირი“

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: _____, 2019 წ.

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

ავტორის ხელმოწერა

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

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

რეზიუმე

ძალოვანი ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის ერთ-ერთ კომპონენტს ტრანსფორმატორის ზეთი წარმოადგენს, რომლის თვისებები ექსპლუატაციის განმავლობაში სხვადასხვა ფაქტორების გავლენით იცვლება. ტრანსფორმატორის ზეთის ხარისხის კონტროლისთვის შემოკლებული ან სრული ანალიზი ტარდება შემოკლებული ანალიზი მოიცავს 6 პარამეტრის განსაზღვრას, ხოლო სრული - დაახლოებით 24 პარამეტრისას. ძალზე მნიშვნელოვანია არსებობდეს მეთოდი, რომლის საშუალებითაც ორ ან მეტ მახასიათებელს დავუკავშირებთ ერთმანეთს და ერთი მახასიათებლის განსაზღვრით ვიმსჯელებთ მეორეზე. შეიძლება ეს გამოვიყენოთ, როგორც პარამეტრების ურთიერთგადაამოწმების საშუალება, რატქმაუნდა მნიშვნელოვანია, როდესაც ერთმანეთს უკავშირდება სატრანსფორმატორო ზეთის ელექტრული და არაელექტრული პარამეტრები.

სადისერტაციო ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს დავამყაროთ ურთიერთკავშირი ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრ გამტარობასა და კინემატიკურ სიბლანტეს შორის, რომლის თეორიული წანამდგრებები არსებობს, მაგრამ ის გამოთვლილია მხოლოდ იდეალურად სუთა ზეთებისათვის და არ არის შესწავლილი საექსპლუატაციო ზეთებისათვის.

ლაბორატორიული მონაცემებით ასეთი ზეთებისათვის ინფორმაცია გვქონდა 20 და 50 °C -ის ტემპერატურებზე ეს ზეთებია BF, TCO და T-1500 მარკის, აგრეთვე შედარების მიზნით გამოვიყენე ავსტრიული წარმოების TECHNOL Y-3 მარკის ზეთი.

BF მარკის ახალი ზეთის სიბლანტე და კუთრი წინააღმდეგობის სიდიდეები 20 და 50 °C- მდე ტემპერატურის გაზრდით აღნიშნული შეფარდება იზრდება ν/ρ მუდმივი არ არის და ტემპერატურის 30 °C -ით მომატებისას მისი სიდიდე საშუალოდ 1.76 ჯერ იზრდება, როდესაც ტემპერატურის 20 და 50 °C- მდე გაზრდისას მისი სიბლანტე საშუალოდ 2.9 ჯერ მცირდება ე.ი ზეთში არსებობს გარკვეული მინარევები, რომლებიც წინააღმდეგობას უფრო მნიშვნელოვნად ამცირებენ ვიდრე სიბლანტეს. სავარაუდოდ ეს ის მინარევებია რომლებიც ტემპერატურის გაზრდით დენის მატარებლების კონცენტრაციას ზრდიან და აღნიშნულ კანონზომიერებას არღვევენ. ანალოგიური შედეგები მივიღეთ TCO და T-1500 მარკის ზეთებისთვის.

ამის შემდეგ გამოვიყენე AES „თელასი“ ის ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთები. ამ ზეთებში უმეტესობა აკმაყოფილებდა საექსპლუატაციო სტანდარტის მოთხოვნებს. ის კანონზომიერება, რომელიც ახალი ზეთებისთვის გამოვლინდა დადასტურდა ექსპლუატაციაში მყოფი ნამუშევარი ზეთებისთვისაც.

შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ახალი და ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისთვის რომლებიც საექსპლუატაციო მოთხოვნებს აკმაყოფილებენ

u/p ტემპერატურის 20 და 50 °C-ის ინტერვალში მუდმივი სიდიდე არ არის და ტემპერატურის გაზრდით ის მიახლოვებით 1.8 ჯერ იცვლება.

ევროპული წარმოების TECHNOL Y-3 მარკის ზეთი ორი სხვადასხვა პარტია იყო, მაგრამ მათ მახასიათებლებს შორის განსხვავება შეინიშნებოდა ორივე პარტიის ზეთისთვის u/p ნებისმიერი ტემპერატურისთვის უფრო

ნაკლებია ვიდრე T-1500 მარკის ზეთებისთვის, რაც ამ ზეთის მაღალ ხარისხზე მიუთითებს და ეს შეფარდება ტემპერატურის გაზრდით თითქმის არ იცვლება.

ტრანსფორმატორის ზეთის u/p დამოკიდებულების შესწავლის მიზნით 20 და 90 °C ტემპერატურის ინტერვალში ჩვენს მიერ გამოყენებული იყო ქვესადგურ „ნავთლული -220“ ის - ტპ ტრანსფორმატორიდან აღებული ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთი, რომელიც არ აკმაყოფილებდა საექსპლუატაციო მოთხოვნებს. ამ მონაცემების მქონე ზეთებისთვის დამუშავების გარეშე განვსაზღვრეთ (ρ) და (ν)- ს მნიშვნელობები აღნიშნულ ინტერვალში და შესაბამის ტემპერატურაზე ვიანგარიშეთ u/p - სიდიდე. რომლის მონაცემებითაც ავაგეთ u/p დამოკიდებულების გრაფიკი ტემპერატურაზე საიდანაც ჩანს, რომ საწყის ეტაპზე 40 °C -მდე ტემპერატურის გაზრდით u/p უმნიშვნელოდ იზრდება აღწევს მაქსიმუმს, შემდეგ მცირდება და ბოლოს ისევ იზრდება, აღნიშნული ცვლილება სავარაუდოდ განპირობებულია $t=50^{\circ}\text{C}$ -ის ინტერვალში ბმული წყლის გახსნილ წყალში გადასვლით, რაც მკვეთრად ამცირებს კუთრ წინაღობას, ხოლო $t=90^{\circ}\text{C}$ -ის მახლობლობაში ადგილი აქვს თავისუფალი წყლის აორთქლების დაწყებას, რის გამოც წინააღმდეგობა უნიშვნელოდ იზრდება, ხოლო ν -ს დამოკიდებულება t -ზე თითქმის ექსპონენციალურ სახეს ატარებს.

ამ ფაქტორების გამორიცხვის მიზნით ჩვენ აღნიშნულ ზეთს ჩავუტარეთ გაფილტვრა თავისუფალი გადინების მეთოდით, რის შედეგადაც მექანიკური მინარევების კლასი შეესაბამებოდა სტანდარტის X კლასს და საგრძნობლად შემცირდა თითქმის ყველა ზომის ნაწილაკების რიცხვი, მაგრამ ამ გაფილტვრის შედეგად მაინც არ შემცირდა ტენშემცველობა ასეთი ზეთისთვის განვსაზღვრეთ სხვადასხვა ტემპერატურაზე ν , ρ და ν/ρ -ს შეფარდება საიდანაც ჩანს რომ წინააღმდეგობა ρ თითქმის 20-40 ჯერ გაიზარდა, ხოლო სიბლანტე თითქმის არ შეცვლილა.

ტენის გამორიცხვის მიზნით მოვახდინეთ გაფილტვრული ზეთის ვაკუუმის ქვეშ $P=50$ მმ.ვწ.სვ დამუშავება 10 წუთის განმავლობაში, რამაც ტენშემცველობა 40 გრ/ტ- დან 15 გრ/ტ მდე შეამცირა. ამასთანავე მექანიკური მინარევების კლასი და რაოდენობა თითქმის უცვლელი იყო და სიბლანტეს ცვლილება არ განუცდია. ასეთი ზეთების ν/ρ -ს სიდიდე თითქმის 70°C ტემპერატურამდე ახალი ზეთებისთვის მიღებულ სიდიდეს 2-ჯერ აღემატება, მაგრამ უცვლელი რჩება, რაც იმის მაჩვენებელია რომ დავადგინოთ როგორ იცვლება ტემპერატურა სხვადასხვა დიაპაზონში ν/ρ -სიდიდე. მოვახდინეთ მოცემული სიდიდის მნიშვნელობების შეფარდება $t=20, 50$ და 80°C ისთვის რამაც გამოავლინა, რომ 50°C ტემპერატურამდე მიუხედავად ზეთის მდგომარეობისა აღნიშნული შეფარდების

მნიშვნელობა მიახლოებით 1-ის ტოლია, რაც კარგად ეთანხმება ფორმულის პირობებს, მაგრამ 50°C დან 80°C- მდე ტემპერატურის გაზრდით აღნიშნული შეფარდება თითქმის 2 ჯერ მცირდება, რაც იმას ნიშნავს, რომ აღნიშნულ შეფარდებაში კუთრი წინააღმდეგობის შემცირება ტემპერატურის მიხედვით უფრო ძლიერ გავლენას ახდენს ვიდრე ν -ს შემცირება. ეს კი ადასტურებს მოსაზრებას, რომ ტემპერატურის გაზრდით ადგილი აქვს დენის მატარებელი ნაწილაკების რიცხვის გაზრდას, რაც სავარაუდოდ მინარევების დისოციაციითაა გამოწვეული.

Resume

One of the key component of the power transformer insulation system is transformation oil, which features changes during operation due to the various different factors. A shorten analysis is performed for transformer oil in order to determine the quality of the oil. The shorten analysis comprises the determination of 6 parameters and the full one –of about 24 parameters. It is most important to have a method by which we will link two or more features and by determining one feature we will be able to discuss about others. Such a method can be used as mutual check of oil parameters. Of course it is important when transformer oil electrical and non-electrical parameters are lined to each other.

The main goal of the dissertation work is to establish an interconnection between transformer oil conductivity and kinematical viscosity. In theory its pretexts exist, but it is finished for ideally pure oils and is not studied for exploitation real oils.

According to laboratory data we had information for such oils at 20 and 50 °C degrees. There are oils of BF, TCO and T-1500 marks, we also used an Australian TECHNOL Y-3 oil for comparison.

Viscosity and resistance for new BF is changing the temperature from 20 and 50°C. ν/ρ Is not a permanent value and during increasing the temperature by 30 deg the value increases about 1.76 times, while in the mentioned temperature range from 20 and 50°C viscosity is decreasing exponentially 2.9 times on average, so there are some admixtures in oil, that more significantly reduce oil resistance than oil viscosity. Probably there are admixtures that increase the concentration of conductors by rising the temperature and violate this regularity.

We obtained the similar results for TCO and T-1500 type oils.

Then I used the data from “AES Telasi” oils which are in operation. Most of them were satisfying the standard requirements. These regularities reveled for new oils, are certified for operation worked oils.

We can say that there is not a permanent size for new and operating oils that satisfy operation requirements within the interval of 20 and 50°C ν/ρ and by increasing the temperature it will be increased by approximately 1.8 times. European TECNOL Y-3 oil was taken from two different tanks, but there was minor difference between them. For both tanks the value ν/ρ at any temperature are less than for T-1500 type oils, that shows high quality of those oils and this ratio is almost stable and does not change by increasing the temperature.

In order to study transformer oil ν/ρ ration in the interval of 20 and 90°C we used exploitation oil taken from T-3 of NAVTLUGI 220 substation, which was not satisfying the standard requirements. We have determined (ρ) and (ν) values without treatment. We calculated the ν/ρ size, which data was used to draw ν/ρ ratio diagram at temperature, which shows that at initial stage ν/ρ insufficiently increasing by increasing the temperature to 40 deg, reaches its maximum level, then decreases and finally increasing again. This change is probably caused by combined water pass into free water in the interval of temperature t=50 deg, that significantly reduces specific resistance and close to

$t=90$ deg free water starts evaporating, because of that resistance significantly increases and (ν) value on temperature has almost an exponential character.

In order to eliminate those factors we performed filtration of mentioned oil by means of free outflow after class of mechanical admixtures complies with X- class of standard and number of particles size was significantly decreased. In spite of filtration the humidity of the oil was still remained. For this oil we determined (ρ) and (ν) values on different temperatures and calculated ν/ρ ratio. This shows that the oil resistance increased almost 20-40 times and viscosity was not changed.

In order to eliminate humidity we treated oil again by vacuum $P=50$ during 10 minutes. As a result oil humidity reduced from 40mg/t to 15 mg/t. Mechanical admixture class and viscosity were remained. Such oils ν/ρ ratio is more less Stabil up to 70 deg. In order to determine how temperature difference changes in diapason ν/ρ size we had the ratio of this size meaning for $t=20, 50$ and 80 deg, it shows that at 50 deg, despite the oil state, the meaning of this ratio is about 1, that confirms to terms of the formula, but by increasing the temperature from 50 deg to 80 deg this ratio will decreases almost twice, that means that in this ratio the reduction of resistance according to the temperature exerts stronger influence than the reduction of viscosity. This confirms the opinion that by increasing the temperature the increase of number of conductor particles takes place, which probably is caused by admixtures dissociation.

შინაარსი

83

შესავალი	15
ლიტერატურის მიმოხილვა.....	17
თავი 1. ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლები.....	23
1.1. ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრული, ფიზიკური და ქიმიური მახასიათებლები	23
1.2. ტრანსფორმატორის ზეთის სიბლანტის განსაზღვრის მეთოდი ...	29
1.3. ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინააღმდეგობის განსაზღვრის მეთოდი	31
1.4. სატრანსფორმატორო ზეთის ტენშემცველობის განსაზღვრა	34
1.5. სატრანსფორმატორო ზეთის მექანიკური მინარევის შემცველობის დადგენის მეთოდი	39
1.6. ტრანსფორმატორის ზეთის მინარევებისგან გაწმენდის მეთოდი ...	44
1.7. სატრანსფორმატორო ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდის დადგენა ..	48
1.8. მჟავური რიცხვის განსაზღვრა	53
1.9. სატრანსფორმატორო ზეთის სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდები ..	57
1.9.1. ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების განსაზღვრა.....	59
1.9.2. ტრანსფორმატორის ზეთის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის განსაზღვრა	63
1.9.3. ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობის დადგენა ..	65
1.9.4 ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხის მაჩვენებლის განსაზღვრა. .	69
თავი 2. ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლებს შორის კავშირი.....	72
2.1. მინარევების გავლენა ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევ ძაბვაზე. .	72

2.2. ტრანსფორმატორის საექსპლუატაციო ზეთის v/p და $tg\delta$ -ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.	83
2.3. ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხის მაჩვენებელსა და სიმკვრივეს შორის ურთიერთკავშირი.	94
2.4. ტრანსფორმატორის ზეთის მჟავურ რიცხვსა და ზედაპირულ დაჭიმულობას შორის ურთიერთკავშირი.	99
დასკვნა	107
გამოყენებული ლიტერატურა.108

ცხრილების ნუსხა

83

- ცხრილი 1.** ტრანსფორმატორის ზეთების ძირითადი მახასიათებლები.25
- ცხრილი 2.** 100 გრ. ზეთში შეწონილი ნაწილაკების განაწილება ზომების და % რაოდენობის მიხედვით.43
- ცხრილი 3.** გამოხდილი წყლის სიმკვრივე (ρ) და ზედაპირული დაჭიმულობა (σ) ტემპერატურების მიხედვით67
- ცხრილი 4.** ტრანსფორმატორის ზეთის პარამეტრებს შორის კავშირი.77
- ცხრილი 5.** ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევ ძაბვასა და ვარიაციის კოეფიციენტის დამოკიდებულება.79
- ცხრილი 6.** ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევ ძაბვასა და ვარიაციის კოეფიციენტის დამოკიდებულება უბნების მიხედვით.81
- ცხრილი 7.** „ნავთლული-220“ ტ-3 ტრანსფორმატორის ავზის ზეთის საწყისი მახასიათებლები.84
- ცხრილი 8.** T-1500 მარკის ახალი ზეთი.86
- ცხრილი 9.** ქ. ს „ნავთლული -220“ T-3 ტრანსფორმატორის ზეთის v , p და v/p დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. 87
- ცხრილი 10.** ქ.ს „ნავთლული-220“-ის ზეთის მექ. მინარევების განაწილება ზომის მიხედვით თავისუფალი გადინებით, გაფილტვრის შემდეგ. 89
- ცხრილი 11.** ქ. ს „ნავთლული-220“ T-3 ტრანსფორმატორის ზეთის v , p , $t_{გ}$ სიდიდეები სხვადასხვა ტემპერატურაზე თავისუფალი გადინებით გაფილტვრის შემდეგ. 90
- ცხრილი 12.** ქ. ს „ნავთლული - 220“ ტ-3 ტრანსფორმატორის ზეთის, მახასიათებლები გაფილტვრისა და ვაკუუმირების შემდეგ. 92

ცხრილი 13. ახალი ზეთები.....	95
ცხრილი 14. ძველი ნამუშევარი ზეთები.....	98
ცხრილი 15. ტრ-ის ზეთის ზედაპირულ დაჭიმულობასა და მჟავურ რიცხვს შორის კავშირი ..	102

ნახაზების ნუსხა

83

ნახაზი 1. ზეთის მოძრაობა ტრანსფორმატორის ავზში.	24
ნახაზი 2. ენგლერის ვისკოზიმეტრის ჭრილი.	30
ნახაზი 3. სამელექტროდიანი ბრტყელი ელექტროდთა სისტემა.	33
ნახაზი 4. გამოცდის დანადგარი „ედი-2 M“.	36
ნახაზი 5. ტრანსფორმატორის ზეთის გასაფილტრი მოწყობილობა.	45
ნახაზი 6. შერინგის ბოგირის P5026M პირდაპირი სქემა.	46
ნახაზი 7. АИМ-90 ტიპის დანადგარის ელექტრული სქემა.	49
ნახაზი 8. ტრ-ის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების და შეუღწევადობის შერინგის ბოგირით გაზომვის სქემა.	61
ნახაზი 9. სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის (ა) და განსაზღვრის (ბ) სქემა.	66
ნახაზი 10. (გამრღვევი ძაბვების) პარალელური ჩართვის სქემა.	73
ნახაზი 11. ელექტრული ველის ძალწირების განაწილება.	75
ნახაზი 12. ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევ ძაბვასა და ვარიაციის კოეფიციენტის დამოკიდებულების გრაფიკი.	80
ნახაზი 13. გამრღვევი ძაბვის ალბათური განაწილება ცალკეული უბნების მიხედვით.	82
ნახაზი 14. ქ. ს „ნავთლული -220“ ტ-3 ტრ-ის ზეთის v/p დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.	88
ნახაზი 15. ქ. ს „ნავთლული -220“ ტ-3 ტრ-ის ზეთის v დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.	88
ნახაზი 16. ქ. ს „ნავთლული-220“-ის ტ-3 ტრ-ის ზეთის $t_{გნ-ს}$ დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, თავისუფალი გადინებით გაფილტვრის შემდეგ.	90

ნახაზი 17. ქ. ს „ნავთლული-220“-ის ტ-3 ტრ-ის ზეთის *v/p* -ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, თავისუფალი გადინებით გაფილტვრის შემდეგ. 91

ნახაზი 18. ქ. ს „ნავთლული - 220“ T-3 ტრანსფორმატორის ზეთის, *tგდ*-ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე გაფილტვრისა და ვაკუუმირების შემდეგ.92

შესავალი

ნაშრომის მეცნიერულ სიახლეს წარმოადგენს :

პირველად ექსპერიმენტალურად დამყარდა კავშირი ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთების ელექტრულ და არაელექტრულ პარამეტრებს შორის, კერძოდ :

1. ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრ წინაღონასა და კინემატიკურ სიბლანტეს შორის სხვადასხვა ტემპერატურაზე და ზეთის სხვადასხვა აირშემცველობის და ტენშემცველობისას.
2. ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხვის მაჩვენებელსა და სიმკვრივეს შორის როგორც ახალი ისე ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისთვის.
3. ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთის მჟავურ რიცხვსა და ზედაპირულ დაჭიმულობას შორის.

სამუშაოს მიზანია აღნიშნული კანონზომიერების ექსპერიმენტალურად დადგენა და ახალი ზეთებისათვის არსებული კანონზომიერების ექსპლუატაციაში მყოფ ზეთებზე შემოწმება.

კვლევების შედეგები. შესაძლებელია პრაქტიკაში ზეთის ლაბორატორიული კვლევისას იქნას გამოყენებული, როდესაც პარამეტრების ურთიერთ შემოწმება აუცილებელი ან სასურველია მახასიათებლის მნიშვნელობის გამოთვლა, როდესაც არ არის შესაძლებლობა ცდის საშუალებით განვსაზღვროთ რომელიმე პარამეტრი.

აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები აპრობირებული იყო:

1. სტუდენტთა 80-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე. 2013 წელი;
2. მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - „ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“. ქუთაისი, საქართველო 25-26 მაისი 2013 წელი;

3. სტუ-ის ელექტროენერგეტიკისა და ელექტრომექანიკის
დეპარტამენტში I, II და III კოლოქვიუმებზე და წინასწარ დაცვაზე
- დეპარტამენტის გაფართოებულ სხდომაზე - 01.12.2018 წ.

ლიტერატურის მიმოხილვა

სადისერტაციო ნაშრომში დასმულ პრობლემასთან დაკავშირებით ლიტერატურაში ძალიან მცირე ინფორმაცია მოიპოვება: ამ ლიტერატურიდან ახსანიშნავია

1. Никурадзе А. Жидкие диелектрики пер. с Немец. Г. Стышлеева. მოსკოვი, 1936 წელი.

გამოთქმულია სავარაუდო მოსაზრება თხევადი დიელექტრიკის კერძოდ ტრანსფორმატორის ზეთის ფიზიკურ და ელექტრულ პარამეტრებს შორის, მაგრამ ამ საკითხის შემდგომი განვითარება აღნიშნული ავტორის მიერ არ მოხდა.

2. Борисова М. Э., Койков С. Н. Физика диелектриков. ლენინგრადი, 1979 წელი.

განხილულია ძალიან სუფთა სითხის სიბლანტის ცვლილების გავლენა თხევადი დიელექტრიკის ელექტროგამტარებლობაზე, რაც მხოლოდ თეორიულ მოსაზრებას წარმოადგენს და წმინდა პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით არარის განხილული.

3. Богородцкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электромеханические материалы. ლენინგრადი, 1985 წელი.

განხილულია თეორიული კავშირი საიზოლაციო სითხის ელექტროგამტარებლობასა და სიბლანტეს შორის და გამოთქმულია მოსაზრება ამ კავშირის შესაძლებელი პრაქტიკული გამოყენებისა. მოყვანილია ზოგადი ფორმულა.

4. Тареев Б. М., Физика диелектрических материалов. მოსკოვი, 1982 წელი.

განხილულია და აღწერილია იდეალური თხევადი დიელექტრიკების ელექტროგამტარებლობისა და სიბლანტეს შორის კავშირი, მაგრამ ექსპლუატაციაში მყოფი ან საექსპლუატაციოდ მომზადებული ტრანსფორმატორის ან საკაბელო ზეთების შესახებ ინფორმაცია არ მოიპოვება.

აქვე განხილულია ვერმანის კოეფიციენტი ან თეორიული კავშირი საიზოლაციო ზეთის გარდატეხვის მაჩვენებელსა და ფარდობით დიელექტრიკულ შეღწევადობას შორის აგრეთვე გამოთქმულია მოსაზრება მისი პრაქტიკული გამოყენების შესაძლებლობის შესახებ.

5. Литштейн Р. А., Шахнович М. И. Трансформаторное масло. М.: “Энергоатомиздат” 1993.

განხილულია ტრანსფორმატორის ზეთის წარმოების მეთოდები, მისი დაძველების მიზეზები და ამ პროდუქტების წარმოქმნის მექანიზმები.

დაძველების პროდუქტების გავლენა ტრანსფორმატორის ზეთის ფიზიკურ, ელექტრულ და ქიმიურ მახასიათებლებზე. განხილულია ზეთის დაძველების სხვადასხვა მექანიზმები და დაძველების პროცესი. არ მოიპოვება ინფორმაცია ჩვენს მიერ დასმული პრობლემების ირგვლივ.

ზემოთგანხილული ლიტერატურული წყაროებიდან საბოლოოდ შეგვიძლია შემდეგი სახის თეორიული მოსაზრების ჩამოყალიბება, რომელიც შემდგომში კვლევის თეორიულ საფუძვლად გამოვიყენეთ:

თხევადი დიელექტრიკების ელექტრო-გამტარებლობა მჭიდროდ არის დაკავშირებული სითხის მოლეკულების აგებულებასთან, მასში მყოფი მინარევების, დისოცირებულ და არადისოცირებულ ნაწილაკებთან და ტენშემცველობასთან. ველის მოქმედებით წყლის მოლეკულები და დისოცირებული ნაწილაკები გამტარებლობის დენს ქმნიან და ძირითადი გადამტანები არიან ელექტრული მუხტის. თუ მათი რაოდენობა იზრდება შესაბამისად გამტარებლობაც იზრდება და წინააღმდეგობა რა თქმაუნდა მცირდება. ცნობილია ისიც რომ სითხის გაწმენდა აღნიშნული მინარევებისგან ელექტრულ გამტარებლობას ამცირებს, ანუ მისი კუთრი წინაღობა იზრდება.

ტემპერატურის გავლენა თხევადი დიელექტრიკის ელექტრულ გამტარებლობაზე მნიშვნელოვანია იმდენად, რამდენადაც ის ადიდებს მინარევების ძვრადობას და დისოციაციის ხარისხს, შესაბამისად იზრდება გამტარებლობა. ტემპერატურის გაზრდით მინარევების გამტარებლობა

ექსპონენციალურად იზრდება, ეს იმას ნიშნავს რომ თუ სხვა გარე ფაქტორებიც არ მოქმედებენ, მაშინ ტემპერატურის გაზრდით გამტარებლობა (γ) ექსპონენციალურად გაიზრება და აღნიშნული კანონზომიერება შედეგი ფორმულით გამოისახება:

$$\gamma_t = \gamma_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (1)$$

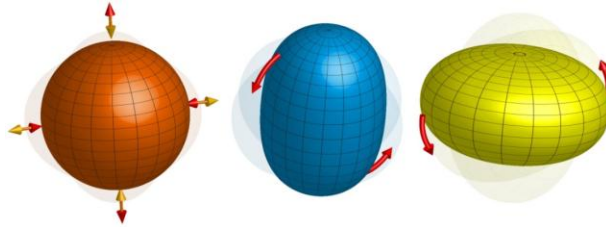
სადაც, γ_0 - გამტარებლობის სიდიდეა საწყის t_0 - ტემპერატურაზე, ხოლო α - კი მოცემული სითხისათვის გამტარებლობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების კოეფიციენტია და გვიჩვენებს თუ რამდენჯერ იზრდება მისი გამტარებლობა ტემპერატურის 1°C -ით მომატებისას. γ_t - სითხის გამტარებლობაა t -ტემპერატურაზე.

სითხის სიბლანტე (ν) ანუ შიგა ხახუნი არის იმ წინააღმდეგობის ძალის სიდიდე, რომელიც უნდა გადალახოს სითხის ერთმა ფენამ მეორის მიმართ თავისი გადაადგილების გზაზე მოძრაობისას და სიბლანტე დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, კერძოდ ტემპერატურის გაზრდით ფენებს შორის ურთიერთქმედების ძალა ექსპონენციალურად მცირდება ე.ი მსგავსად (1) ფორმულისა სიბლანტის დამოკიდებულებას ტემპერატურაზე შემდეგი სახე აქვს :

$$\nu_1 = \nu_0 e^{-\beta(t-t_0)} \quad (2)$$

ამ გამოსახულებაში (ν_1) და (ν_0)- სითხის სიბლანტეებია t და t_0 ტემპერატურებზე, ხოლო β სიბლანტის ტემპერატურული კოეფიციენტია და გვიჩვენებს თუ რამდენჯერ მცირდება სიბლანტე ტემპერატურის 1°C -ით გაზრდისას. თუ (1) და (2) გამოსახულებას ნახევრადლოგარითმულ კოორდინატთა სისტემაში გამოვსახავთ, მაშინ პირველი დამოკიდებულების მრუდი იქნება სწორი ზრდადი ხაზი, ხოლო მეორე დამოკიდებულება სწორი ხაზი შემცირდება.

სიმარტივისთვის ჩვენ შეგვიძლია დავუშვათ, რომ დენის გადამტან ნაწილაკებს სფეროსებური ფორმა აქვთ და მათ მოძრაობას ველის მოქმედებისას გარკვეულ წილად ეწინააღმდეგება (ხელს უშლის) სიბლანტე.



ამის გამო პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია შევისწავლოთ სითხის სიბლანტის გავლენა ელ. გამტარებლობაზე სხვადასხვა ფაქტორების ზემოქმედებისას.

ამის საფუძველს ჩვენ გვაძლევს ლიტერატურაში არსებული შემდეგი მოსაზრება 1. დავუშვათ, რომ დენის გადამტანი ნაწილაკები სფეროს ფორმის არიან. მაშინ ასეთი ნაწილაკების მოძრაობას ბლანტ გარემოში მუდმივი ძალის მოქმედებით სტოქსის კანონის თანახმად მოძრაობის სიჩქარე ტოლი იქნება:

$$V = \frac{F}{6\pi r \nu} \quad (3)$$

სადაც F- ამ ნაწილაკებზე მოქმედი ძალაა r- კი მათი რადიუსი, ხოლო ν - სითხის სიბლანტეა.

რადგანაც F- ძალაა რომლითაც E-დაძაბულობის მქონე ელექტრული ველი მოქმედებს q მუხტის მქონე ნაწილაკებზე მაშინ შეგვიძლია ვთქვათ რომ:

$$F = qE \quad (4)$$

ცნობილია, რომ სითხის ელექტრო გამტარებლობა ზოგადად შემდეგი ფორმულით გამოისახება:

$$\gamma = \frac{n \cdot q \cdot \nu}{E} \quad (5)$$

სადაც n- დენის გადამტანი ნაწილაკების რიცხვია q- მათი მუხტია, ხოლო ν - მოძრაობის სიჩქარეა.

თუ (4) გამოსახულებაში შევიტანთ (3) და (5) მაშინ მივიღებთ რომ:

$$\gamma = \frac{n \cdot q^2}{6\pi r v} \quad (6)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ:

$$\gamma \cdot v = \frac{v}{\rho} = \frac{n \cdot q^2}{6\pi r} \quad (7)$$

ეს ფორმულა ცნობილია, როგორც პისაჟევსკის და ვალდენის კანონი, რომელიც ამტკიცებს, რომ თუ ტემპერატურის გაზრდით n , q და r - არ იცვლება მაშინ ნებისმიერი თხევადი დიელექტრიკისათვის $\gamma \cdot v$ - მუდმივი სიდიდეა ნებისმიერ ტემპერატურაზე. ეს მოსაზრება თეორიულად არის მიღებული პრაქტიკაში არ შემოწმებულა.

ჩვენ მიზნად დავისახეთ შეგვემოწმებინა აღნიშნული კანონზომიერება ახალი და ექსპლუატაციაში მყოფი სტრანსფორმატორო ზეთებისათვის და დაგვედგინა ამ ნამრავლის სიდიდე სხვადასხვა ტემპერატურაზე ექსპლუატაციისთვის უვარგისი და ახალი ზეთებისათვის.

ლიტერატურიდან ცნობილია რომ [1,2] ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგები 50 ჰერც სიხშირეზე თითქმის არ არის განპირობებული დიპოლურ-რელაქსაციური პოლარიზაციით და მაშინ შეგვიძლია ვთქვათ, რომ დანაკარგები განპირობებულია მხოლოდდამხოლოდ ელექტროგამტარებლობის მოვლენით, რომელიც შემდეგი ფორმულით გამოისახება:

$$\frac{\gamma}{\text{tg}\delta} = \frac{\epsilon \cdot f}{1.67 \cdot 10^{10}} \quad (8)$$

ექსპერიმენტალური მონაცემები ამ კანონზომიერებას ადასტურებენ. აღნიშნულ ფორმულაში თუ გავითვალისწინებთ, რომ f - სამრეწველო სიხშირეზე 50 ჰერცის ტოლია, ხოლო ϵ - ტრანსფორმატორის ზეთისათვის 2.2 - უდრის და $\gamma = \frac{1}{\rho}$, მაშინ მივიღებთ, რომ

$$\rho \cdot \text{tg}\delta = 1.52 \cdot 10^8 \quad (9)$$

ექსპერიმენტალური მონაცემებით უფრო დაზუსტებულ გამოსახულებას შემდეგი სახე აქვს.

$$\rho \cdot \text{tg}\delta = 1.65 \cdot 10^8 \quad (10)$$

ამ ფორმულის გამოყენების დროს დაშვებული იყო, რომ ტრანსფორმატორის ზეთში დანაკარგებს განაპირობებს ზეთის დაძველების პროდუქტები, რომლებიც ზეთში და წყალში იხსნებიან, როგორცაა დაბალმოლეკულური მჟავები საპნისმაგვარი ნივთიერებები და სხვა სახის მინარევები, რომლებიც ადვილად დისოცირდებიან ტრანსფორმატორის ზეთში და ველის მოქმედებით წარმოქმნიან დამატებით ელექტროგამტარებლობას და დიელექტრიკულ დანაკარგებს, ხოლო ექსპლუატაციისას დაძველებულ ზეთებში აღნიშნულ პროცესებში დამატებით მონაწილეობენ დაძველების ის პროდუქტები, რომლებიც ზეთის მოლეკულებთან სუსტ წყალბადურ კავშირს ამყარებენ და წყლის მოლეკულები [3].

აღნიშნული მოსაზრება ემყარება პრაქტიკულ გამოცდილებას, რომელიც მიღებული იყო ექსპლუატაციაში ნამყოფი ზეთების გაწმენდის შემდეგ მისი წინააღმდეგობის გაზრდით და დიელექტრიკული დანაკარგების შემცირების შედეგად და ამ მოსაზრებას პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს.

ჩვენს მიერ სიბლანტისა და კუთრი წინააღმდეგობის ურთიერთ კავშირის შესასწავლად ზოგიერთ შემთხვევაში აღნიშნულ კანონზომიერებასაც ვიყენებდით (10) და მას უფრო გაზომვის სიზუსტის კონტროლის მექანიზმი ენიჭებოდა.

თავი 1

ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლები

1.1. ტრანსფორმატორის ზეთის ელექტრული, ფიზიკური და ქიმიური მახასიათებლები

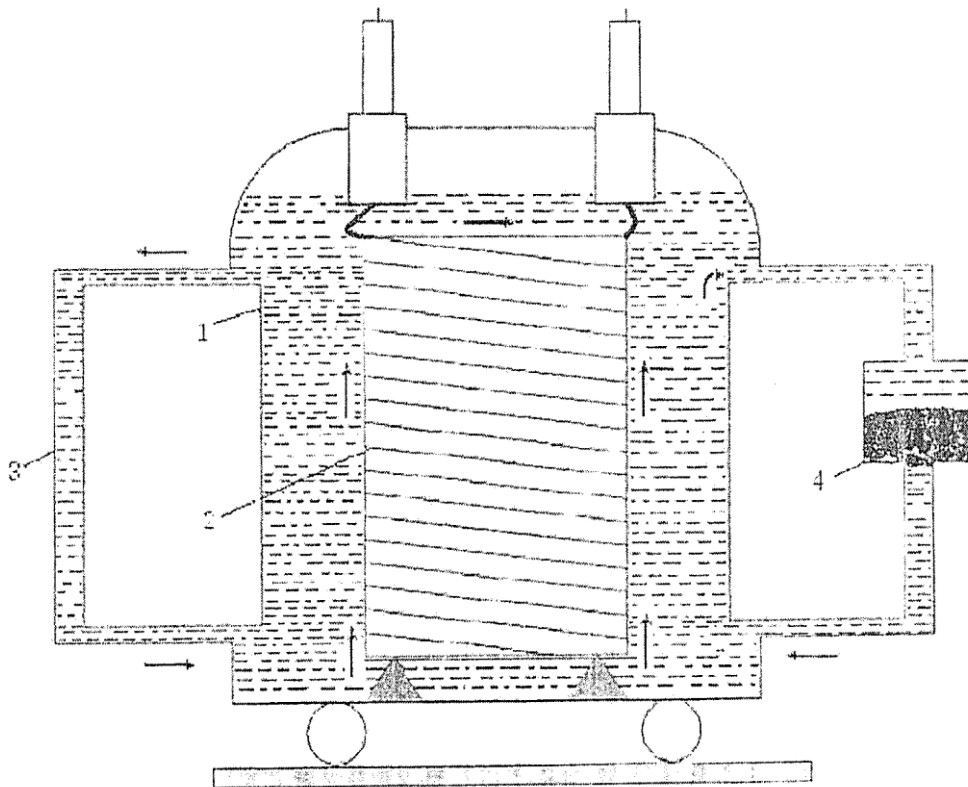
ნავთობის ელექტროსაიზოლაციო ზეთები პარაფინული, ნაფტენური და არომატული ნახშირწყალბადების ნარევის წარმოადგენენ და ნავთობის ფრაქციული გამოხდით მიიღებიან. ჯერ გამოიხდება მსუბუქი ფრაქციები: ბენზინი, ლიგროინი, ნავთი და დიზელის საწვავი, ხოლო დარჩენილი მძიმე ფრაქციიდან გამოიყოფა სოლიარის დისტილატი, რომლისგანაც 300-400°C ტემპერატურაზე ნავთობის ზეთის ნახევარფაბრიკატი გამოიყოფა, ამ უკანასკნელისაგან ელექტროსაიზოლაციო ზეთების მისაღებად მისი შემდგომი ფიზიკო-ქიმიური გადამუშავება ხდება.

იმისდა მიხედვით, თუ როგორი წარმოშობისაა ნავთობნედლეული და როგორი დანიშნულების საიზოლაციო ზეთებია მისაღები, ანსხვავებენ: მჟავურ-ტუტოვან, კარბამიდულ, ადსორბციულ, სელექტიურ და სხვა სახის გადამუშავება-გაწმენდას. ქიმიური გადამუშავების შემდეგ მასში ქიმიური რეაქციის ნარჩენები რჩება. მათი ზეთიდან მოცილება წყლის საშუალებით ხდება („წყლით გარეცხვა“), ხოლო ზეთიდან წყლის მოცილებას კი სპეციალური დანადგარები ახდენენ.

თვისებებისა და გამოყენების მიხედვით ასხვავებენ ტრანსფორმატორის, საკონდენსატორო და საკაბელო ზეთებს.

ტრანსფორმატორის ზეთი ღია ყვითელი ფერიდან მუქი ყავისფერი, ნეიტრალური სითხეა. ის ძირითადად გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის ტრანსფორმატორების ავზის შესავსებად, სადაც მას ორი დანიშნულება აქვს. ავსებს ტრანსფორმატორის ბოჭკოვანი იზოლაციის ფორებს (ქაღალდის) და ამით მის ელექტრულ სიმტკიცეს ზრდის. მეორეს მხრივ გრაგნილში და გულარებში გამოყოფილი სითბოს გადამტანი საშუალებაა ატმოსფეროში

(ნახაზი N1). კერძოდ ტრანსფორმატორის აქტიურ ნაწილში (2) გამოყოფილი სითბო ზეთის მოლეკულებს გადაეცემა. ისინი ფართოვდებიან და ამომგდები ძალის მოქმედებით მაღლა მიემართებიან, რადიატორის (3) საშუალებით.



ნახაზი 1. ზეთის მოძრაობა ტრანსფორმატორის ავზში

სითბოს გარემოს გადასცემენ და ტრანსფორმატორის ავზის (1) ქვედა ნაწილს უბრუნდებიან.

გარდა ზემოთ აღნიშნულისა ტრანსფორმატორის ზეთს მაღალი ძაბვის ამომრთველების შესავსებადაც იყენებენ. ზეთს ამ შემთხვევაშიც ორი დანიშნულება აქვს.

პირველი ქმნის ელექტრულ იზოლაციას, და მეორე მონაწილეობს ამომრთველის მუშაობისას წარმოქმნილი რკალის ჩაქრობაში. ამ უკანასკნელ შემთხვევაში ზეთის თვისებები საგრძნობლად უარესდება.

ტრანსფორმატორის ზეთს აგრეთვე იყენებენ მაღალი ძაბვის გამზომი ტრანსფორმატორების, ტრანსფორმატორების შემყვანი იზოლატორების, რეაქტორების ავზების, ინდუქტიური კოჭების და სხვა აპარატურის შესავსებად.

ელექტროენერგეტიკაში შემდეგი მარკის ნავთობის ზეთები გამოიყენება. TK მჟავური გაწმენდით, TA ადსორბციული გაწმენდით, TC სელექციური გაწმენდით, FK ჰიდროკრეკინგული გაწმენდით და სხვა.

დღეისათვის ჩვენს ქვეყანაში გამოყენება დაიწყო ნაფტენურ ბაზაზე დამზადებულმა ევროპულმა წარმოების ზეთებმა, რომლებიც კარგი ელექტრული თვისებებით ხასიათდებიან.

ცხრილი 1. ტრანსფორმატორის ზეთების ძირითადი მახასიათებლები

N	მახასიათებელი	სიდიდე და განზომილება
1	სიმკვრივე -D20	850÷900 კგ/მ ³
2	კინემატიკური სიბლანტე U20	17÷18.5 სსტ
3	გაყინვის ტემპერატურა tგაყ	მინუს 35°C
4	მჟავური რიცხვი	მინუს 35°C
5	ფეთქის ტემპერატურა	0.03÷0.1 გრ KOH/კგ
6	მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი	მეტი 135°C
7	კუთრი სითბოტევადობა C	0.0065 1/K
8	სითბოსგამტარობის კოეფიციენტი γ	1.5 ჯოული/კგ K
9	დიელექტრიკული შეღწევადობა ε	1.0 ვატი/მ K
10	კითრი წინაღობა ρ	2.1÷2.5 ომი.მ
11	დიელექტრიკული დანაკარგების კოეფიციენტი tgδ	0.0001÷0.025
12	ელექტრული სიმტკიცე E გამრ	10÷40 კვ/მმ

1. სიმკვრივე. რათქმაუნდა ყველა სითხეს გააჩნია გარკვეული სიმკვრივე, მაგრამ თუ ტრანსფორმატორის ზეთის სიმკვრივე მიუახლოვდება ან გადააჭარბებს ციხულის სიმკვრივეს, მაშინ დაბალ ტემპერატურაზე მყოფი ტრანსფორმატორის ზეთში წარმოქმნილი ციხულის ამოტივტივების შესაძლებლობა იქნება, რაც გამოიწვევს სხვადასხვა პოტენციალის ქვეშ მყოფი დენგამტარ დეტალებს შორის მოკლედშერთვას.

2. კინემატიკური სიბლანტე ისაზღვრება 20 და 50°C-ტემპერატურაზე და მისი სიდიდე ნორმირებულია, 20°C-ზე ის არ უნდა აღემატებოდეს 19 ს.სტ-ს და 50°C-ზე არანაკლები 5-ს.სტ-ის. სიბლანტის ეს მნიშვნელობა უზრუნველყოფს ტრანსფორმატორის ზეთის ადვილად შეღწევას ქაღალდის ბოჭკოებში, მის ელექტრულ თვისებებს გააუმჯობესებს და გრაგნილში გამოყოფილ სითბოს გარემოზე გადაცემას. სიბლანტის გაზრდა ტრანსფორმატორის ზეთში თვისობრივი ცვლილებების მანიშნებელია.

3. გაყინვის ტემპერატურა. ტემპერატურის შემცირებით სიბლანტე მნიშვნელოვნად იზრდება და 30°C-ზე ის 1200-1300 ს.სტ აღწევს, მაგრამ ამ ტემპერატურაზე მყოფი ელექტრო მოწყობილობების მუშაობის დაწყებისას ზეთმა უნდა შეძლოს საიზოლაციო თვისებების შენარჩუნება და სითბოგადაცემის უზრუნველყოფა. ზეთით შევსებულ ამომრთველებში დაბალ ტემპერატურაზე მაღალი სიბლანტის გამო შეიძლება ამომრთველის ღეროს მოძრაობა შეფერხდეს, ამის თავიდან ასაცილებლად ამომრთველის ძირში სპეციალურ გამათბობლებს აყენებენ, რომლებიც ზამთრის განმავლობაში ამომრთველის ზეთის ტემპერატურას 10÷20°C-ის ფარგლებში ინარჩუნებენ.

4. მჟავური რიცხვი რაც შეიძლება ნაკლები უნდა იყოს და გვიჩვენებს ზეთის დაძველების ხარისხს მისი ზღვრული მნიშვნელობა 0.1 მგრ ერთ გრამ ზეთზე არ უნდა აღემატებოდეს.

5. ფეთქის ტემპერატურა. სტანდარტით განსაზღვრულია, რომ ფეთქის ტემპერატურა 135°C-ს უნდა აღემატებოდეს. ისაზღვრება დახურულ ტიგელში ექსპლუატაციისას კი ფეთქის ტემპერატურის შემცირება ნიშანია

ტრანსფორმატორში ავარიული პროცესების დაწყების და ხანძარსაშიში მდგომარეობის.

6. მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი გვიჩვენებს თუ რა ნაწილით გაიზრდება ზეთის მოცულობა ტემპერატურის 1°C -ით მომატებისას. ეს პარამეტრი მნიშვნელოვანია ზეთის გამაფართოვებელი მოწყობილობის გაანგარიშებისას.

7.8. კუთრი სითბოტევადობა და სითბოგამტარობის კოეფიციენტი ახასიათებს ტრანსფორმატორის ზეთის უნარს გადასცეს სითბო სითბური კონვექციის საშუალებით გარემოს.

9. დიელექტრიკული შეღწევადობა. რადგან ტრანსფორმატორის ზეთი თხევადი ნეიტრალური დიელექტრიკია მისი ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის სიდიდე 2,5 არ უნდა აღემატებოდეს, მაგრამ ექსპლუატაციისას დიელექტრიკული შეღწევადობის გაზრდა გვიჩვენებს ზეთში დაძველების პროდუქტების, პოლარული ნაწილაკების წარმოქმნას.

10. კუთრი წინააღმდეგობა. ტრანსფორმატორის მაღალი ხარისხის ზეთისათვის მისი მნიშვნელობა 20°C ტემპერატურაზე 10^{10} ომი. მ-ს აღემატება, ხოლო, 90°C -ზე 10-15-ჯერ ნაკლებია, მაგრამ თუ ზეთში დაძველების პროდუქტები წარმოიქმნა ან სხვადასხვა სახის მინარევები გაჩნდა კუთრი წინააღმდეგობა ორივე ტემპერატურაზე მნიშვნელოვნად მცირდება.

11. დიელექტრიკული დანაკარგების კოეფიციენტი $\text{tg}\delta$ ახასიათებს ელექტრული ველის ენერჯის იმ ნაწილს, რომელიც იხარჯება დიელექტრიკის პოლარიზაციაზე და სითბოს სახით დიელექტრიკში გამოიყოფა. მისი ნორმაზე მეტად გაზრდა გვიჩვენებს ზეთსა და ქაღალდში დაძველების პროდუქტების არსებობას.

12. ელექტრული სიმტკიცე. სხვადასხვა ძაბვის ელექტრო საიზოლაციო სისტემებში გამოყენებულ ტრანსფორმატორის ზეთს სხვადასხვა ელექტრული სიმტკიცე გააჩნია, მაგრამ მისი მინიმალური მნიშვნელობა

განსაზღვრულია სტანდარტით, რომელზე ნაკლებ შემთხვევაში ზეთის გამოყენება ავარიის საწყის პირობას ქმნის. ელექტრულ სიმტკიცეს ძირითადად ამცირებს ტენშემცველობა, აირშემცველობა და მექანიკური მინარევები.

აღნიშნული მახასიათებლების გარდა ტრანსფორმატორის ზეთის საექსპლუატაციო ვარგისიანობას კიდევ 20-მდე პარამეტრი განსაზღვრავს, რომლებსაც სპეციალურ ლიტერატურაში შეიძლება გავეცნოთ.

ტრანსფორმატორში ჩასხმამდე ზეთის ყველა მახასიათებელი მოწმდება და თუ მათი მნიშვნელობები სტანდარტით გათვალისწინებულ ნორმებს აკმაყოფილებენ, მაშინ შეიძლება მისი ექსპლუატაცია.

ექსპლუატაციის პროცესში ტრანსფორმატორის ზეთი მუდმივ შეხებაშია, ლითონებთან (ფოლადი, სპილენძი), ბოჭკოვან მასალებთან (ხე, ქაღალდი) და რაც მთავარია, განიცდის ელექტრული ველის და ტემპერატურის ზემოქმედებას. ყოველივე ამის გამო მისი მახასიათებლები თანდათანობით უარესდება, ანუ ზეთი განიცდის დაძველებას. კერძოდ, იზრდება მჟავური რიცხვი, დიელექტრიკული დანაკარგების კოეფიციენტი, მცირდება კუთრი წინაღობა და ელექტრული სიმტკიცე. ყოველივე ამან შეიძლება ტრანსფორმატორის ავარია გამოიწვიოს. ამიტომ ექსპლუატაციისას ზეთის პერიოდული შემოწმება ხდება. ამოწმებენ არა ყველა მახასიათებელს, არამედ ყველაზე მგრძნობიარეს, მაგალითად ზეთის გამრღვევ ძაბვას, დიელექტრიკული დანაკარგების კოეფიციენტს, მჟავურ რიცხვს და სხვა.

ექსპლუატაციისათვის უვარგის ზეთის თვისებების აღდგენა-რეგენერაცია უტარდება.

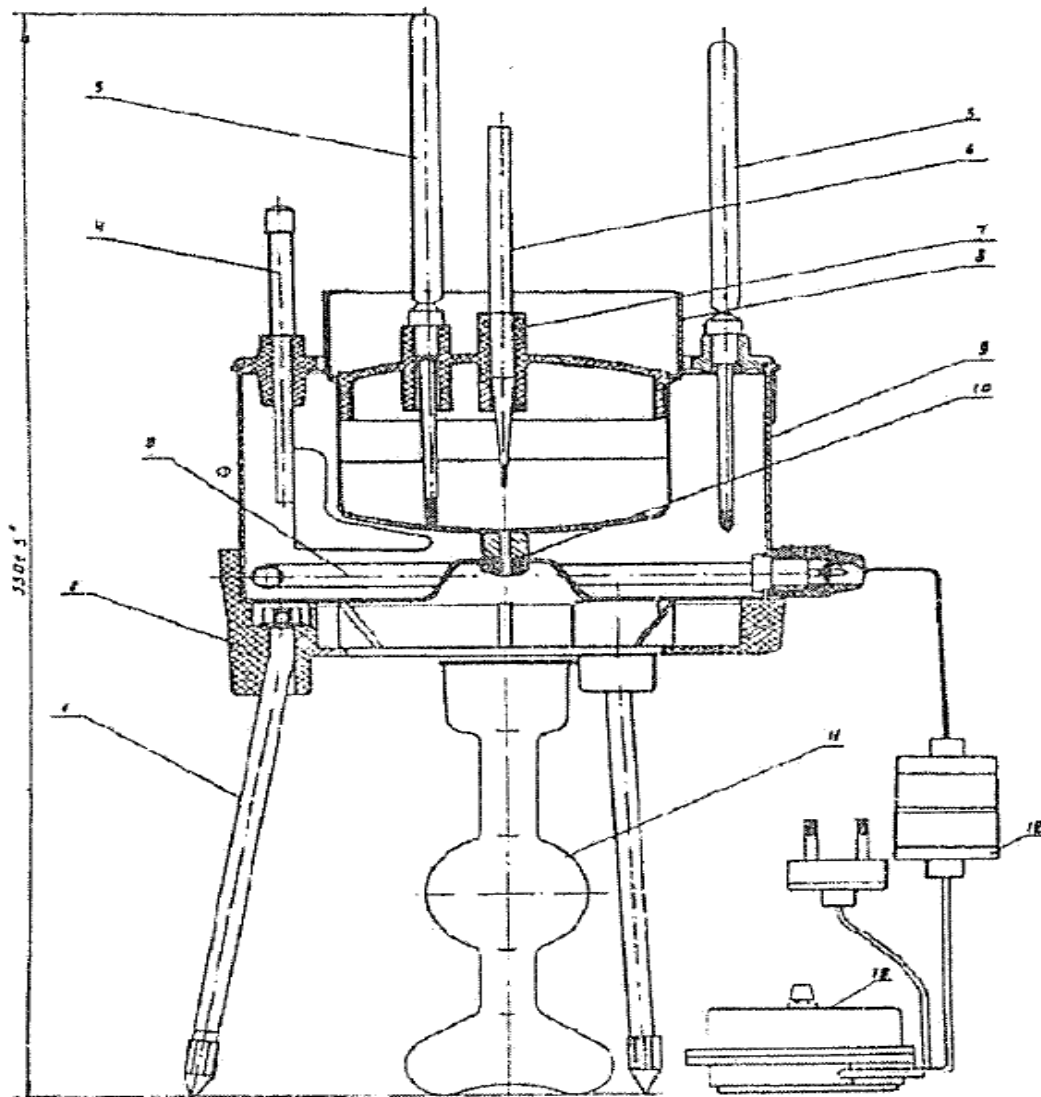
ტრანსფორმატორის ზეთის უწყვეტი რეგენერაცია, ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციის დროს მიმდინარეობს. იგი ტრანსფორმატორის ავზზე დამონტაჟებული თერმოსიფონური ფილტრების (4) საშუალებით წარმოებს. ფილტრში მოთავსებულია ადსორბენტები, რომლებშიც ზეთის გავლისას წყლის და მინარევების მოცილება ხდება.

1.2. ტრანსფორმატორის ზეთის სიბლანტის განსაზღვრის მეთოდი

ხელსაწყოს რომლის საშუალებითაც ხდება ზეთის სიბლანტის დადგენა ვისკოზიმეტრს უწოდებენ. არსებობს ენგლერის, კაპილარული და სხვა სახის ვისკოზიმეტრები. ყველა მათგანს საერთო ერთი პრინციპი გააჩნიათ კერძო: გარკვეული დიამეტრისა და სიგრძის კაპილარში ისაზღვრება განსაზღვრული მოცულობის სითხის გავლის დრო და ეს დრო დარდება ამავე კაპილარში გამოხდილი წყლის 20°C-ზე გავლის დროს, ამ უკანასკნელს ვისკოზიმეტრის მუდმივა η - უწოდებენ. ჩვენი ამოცანიდან გამომდინარე მიზანშეწონილად ჩავთვალეთ გამოგვეყენებინა ენგლერის ვისკოზიმეტრი, რადგან მისი გაზომვის სიზუსტე 2%-ს არ აღემატება.

ნახ N2 - ნაჩვენებია ვისკოზიმეტრის ჭრილი, რომელიც შედგება სითხის შიგა რეზერვუარისაგან (8), რომლის კონუსური ძირის ცენტრში მოთავსებულია სადინარი კაპილარი (10) და ყველაფერი ეს იმყოფება სითხით ან ზეთით შევსებულ აბაზანაში (9), რომლის გათბობაც ხდება გამახურებლით (3). გამახურებელი პირდაპირ აბაზანაშია მოთავსებული. ამავე აბაზანაში გამახურებელსა და რეზერვუარს შორის მოთავსებულია ამრევი (4), რომლის დანიშნულებაა მთელ სითხეში ტემპერატურის გათანაბრება. აბაზანა დამაგრებულია ძირზე (2), რომელიც სპეციალური სამი ფეხით (1) ეყრდნობა მაგიდას. ფეხებს გააჩნია სიგრძის სარეგულირებელი მოწყობილობა, რათა კაპილარი განლაგებული იყოს ვერტიკალურად, რადგან გამოდინება ხდება სიმძიმის ძალის მოქმედებით.

რეზერვუარის სახურავში (7) გაკეთებულია ხვრელი, რომელშიც მაგრდება სპეციალური თერმომეტრი (5) თითქმის რეზერვუარის ძირამდე. თერმომეტრის დანიშნულებაა გასაზომი სითხის ტემპერატურის განსაზღვრა, ასევე თერმომეტრი (5) მოთავსებულია აბაზანაშიც და მისი საშუალებით ისაზღვრება აბაზანის სითხის ტემპერატურა. სახურავის ცენტრში გაკეთებულია ხვრელი, რომელშიც თავსდება სპეციალური ჩხირი (6), რომელიც კეტავს ან ხსნის ვისკოზიმეტრის სადინარს.



ნახაზი 2. ენგლერის ვისკოზიმეტრის კრილი

რეზერვუარის შიგა ზედაპირზე გაკეთებულია ნიშნული, რომელიც მიგვითითებს გამოსაკვლევ სითხის იმ რაოდენობაზე, რომელიც უნდა ჩავასხათ.

გამათბობლის სიმძლავრის რეგულირება ხდება სპეციალური მოწყობილობის საშუალებით (12) და (13). ვისკოზიმეტრის ქვეშ შედგმულია 200 მილილიტრიანი კოლბა, რომელსაც გააჩნია სპეციალური ორი ნიშნული 100 და 200 მილილიტრის შესაბამისი.

ვისკოზიმეტრის მუშაობის პრინციპი მდგომარეობს შემდეგში: აბაზანაში ისხმება გამოხდილი წყალი გარკვეულ ნიშნულამდე, შემდეგ ჩხირის

საშუალებით ვკეტავთ სადინარს და რეზერვუარში ვასხამთ საკვლევ სითხეს 250 მილილიტრამდე სპეციალურ ნიშნულამდე. ვახურავთ სახურავს და ვრთავთ გამათბობელს. ამრევისა და გამათბობლის სიმძლავრის რეგულირების საშუალებით ვაყენებთ რეზერვუარში ცდის ჩატარების ტემპერატურას, ამასთანავე ორივე თერმომეტრის ჩვენება $0,5^{\circ}\text{C}$ -ის სიზუსტით არ უნდა განსხვავდებოდეს ერთმანეთისგან. ტემპერატურის გათანაბრების შემდეგ ჩხირით ვათავისუფლებთ სადინარს და ამავდროულად ვრთავთ წამზომს და ვაფიქსირებთ იმ დროს, რომლის განმავლობაშიც 200 მილილიტრი საკვლევ სითხე გამოედინება. დრო ისაზღვრება 0,1 წამის სიზუსტით ცდა ტარდება 3-ჯერ. მიღებულ სამ სიდიდეში მაქსიმალურ და მინიმალურ მნიშვნელობებს შორის განსხვავება არ უნდა აღემატებოდეს 0,2%-ს.

მიღებული შედეგების საშუალო არითმეტიკულით ისაზღვრება გამოდინების დრო τ . ამის შემდეგ ფორმულით:

$$V_t = \frac{\tau}{\tau_0} \quad (11)$$

ვადგენთ პირობით სიბლანტეს და სპეციალური ცხრილებით ვანგარიშობთ კინემატიკურ სიბლანტებს მოცემულ ტემპერატურაზე.

მიუხედავად იმისა რომ ვისკოზიმეტრის პასპორტში მითითებულია $\tau_0 = 51 \pm 1$. ჩვენს მიერ გამოხდილი წყლის გამოდინებით დაზუსტდა მისი მნიშვნელობა 10 ცდის საშუალებით და მან შეადგინა $\tau_0 = 51 \pm 0,5$. წმ.

1.3. ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინააღმდეგობის განსაზღვრის მეთოდი

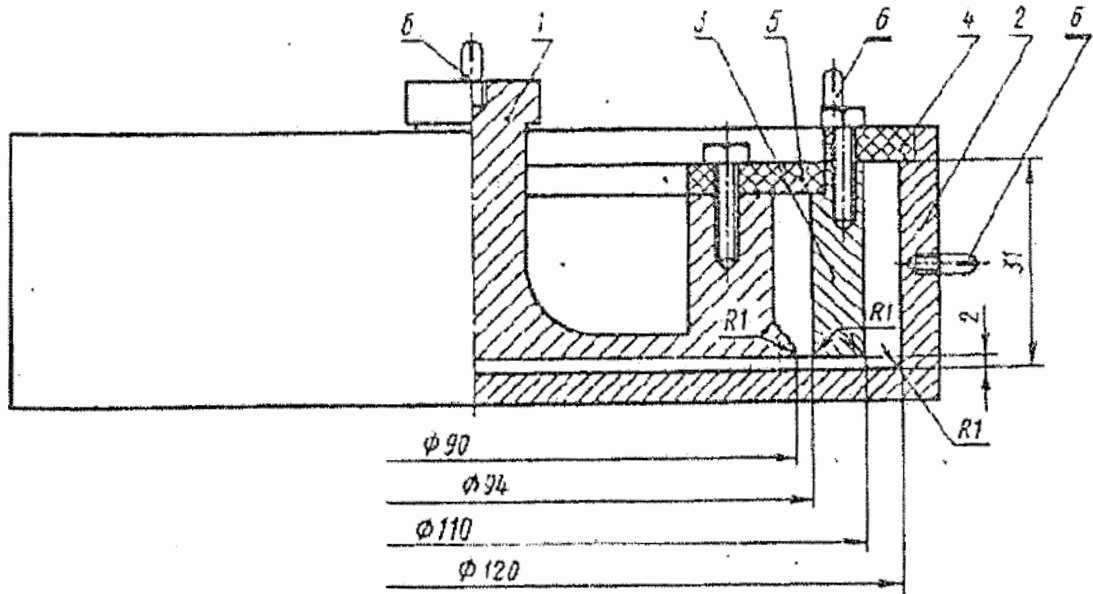
ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრი წინააღმდეგობის განსაზღვრის მეთოდი, ხელსაწყოები და უჯრედის ზომები განსაზღვრულია სახელმწიფო სტანდარტით [6].

სტანდარტი ითვალისწინებს ელექტროდთა სისტემას ცილინდრულს და ბრტყელს, რო ელექტროდიანს და სამ ელექტროდიანს. ჩვენს მიერ გამოყენებული იყო სამ ელექტროდიანი, ბრტყელი, ელექტროდთა სისტემა (ნახაზი N3), რომელიც შედგება შიგა გამზომი ელექტროდისაგან (1), რომელიც სპეციალური მოწყობილობებით ჩადგმულია მაღალძაბვიან გარე ელექტროდთა სისტემაში (2). იმისათვის, რომ ზედაპირული გამტარებლობის დენებმა გაზომვის სიზუსტე არ შეამცირონ ამ ორ ელექტროდს შორის მოთავსებულია დამცავი რგოლი (3), რომელიც ხელსაწყოს ეკრანს უერთდება და მას ამ მიზნით სპეციალური გამომყვანი გააჩნია (6). იმისთვის, რომ ელექტრულად განვაცალკევოთ ერთმანეთისაგან გამზომი ელექტროდი. დამცავი რგოლი და მაღალძაბვიანი ელექტროდი, მათ შორის მოთავსებულია დიდი კუთრი წინაღობის მქონე ელექტრო საიზოლაციო მასალისაგან, კერძოდ ფთოროპლასტისაგან დამზადებული საფენები. გამზომი და მაღალი ძაბვის ელექტროდი ხელსაწყოს შესაბამის მომჭერებს ელექტრულად უკავშირდება (6) ელექტროდების საშუალებით.

ელექტროდების დიამეტრი, მომრგვალების რადიუსი, ელექტროდებს შორის მანძილი და ელექტროდების მასალა სტანდარტით განსაზღვრულია. გამოყენებული მასალები უნდა უძლებდნენ მუშა ტემპერატურას არ განიცდიდეს დეფორმაციას არ შედიოდეს რეაქციაში ზეთთან და არ უნდა იცვლიდეს გეომეტრიულ ზომებს ტემპერატურის მოქმედებისას.

ყოველი ცდის ჩატარების შემდეგ ელექტროდები იწმინდება სტანდარტში მითითებული გამხსნელებით და შემდეგ შრებოდა $105 \pm 110^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე ნახევარი საათის განმავლობაში.

სხვადასხვა ტემპერატურაზე გაზომვების ჩასატარებლად გამზომი უჯრედი თავსდება თერმოსტატში, რომელშიც ტემპერატურა იზომებოდა და რეგულირდებოდა „ENDA“-ს ფირმის EDT1411 ტიპის თერმორეგულატორის საშუალებით $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ -ს სიზუსტით, გაზომვას ვაწარმოებდით სასურველი ტემპერატურის დამყარებიდან 10 წთ-ის შემდეგ.



ნახაზი 3. სამელექტროდიანი ბრტყელი ელექტროდთა სისტემა

თერმოსტატს უკანა მხარეს დატანებული აქვს სამი მაღალძაბვიანი შემყვანები, რომელზეც თერმოსტატში ვაერთებდით გამზომი უჯრედის ელექტროდებს, ხოლო გარეთა მხრიდან გაზომვის ელექტრულ სქემასთან ვამყარებდით ელექტრულ კავშირს.

თერმოსტატის შემყვანების მაღალ ძაბვაზე გათვლა განაპირობა იმან, რომ აღნიშნული ელექტროდთა სისტემა სტანდარტის თანახმად [6] შეგვეძლო გამოგვეყენებინა ამავედროულად დიელექტრიკული დანაკარგების განსასაზღვრავად.

ტრანსფორმატორის ზეთის მოცულობითი წინააღმდეგობის გასაზომად ვიყენებდით „E6-13A“ ტიპის ტერაომმეტრს, რომლის მაქსიმალური გაზომვის დიაპაზონი 10^{13} ომია, ხოლო გაზომვის სიზუსტე მაქსიმალურ დიაპაზონზე $\pm 10\%$ -ს არ აღემატებოდა. გამოყენების წინ ტერაომმეტრი ინსტრუქციის თანახმად 20 წთ-ის განმავლობაში უნდა იყოს ჩართულ მდგომარეობაში, რომ გავიდეს რეჟიმზე, ამის შემდეგ ხდებოდა მისი ისრის ჩვენების გასწორება „0“-ის მდგომარეობაში სპეციალური სახელურით VCT „0“ ამის შემდეგ ტერაომმეტრის მომჭერები მიუერთდებოდა სპეციალური

მაკალიბრებელი P4030M1-წინააღმდეგობის მომჭერებს, შემდეგ დიაპაზონის გადამრთველი გადაირთვებოდა მოსალოდნელ მდგომარეობაში და ჩაირთვებოდა გამზომი დილაკი. ისარი 30 წმ-ის შემდეგ გვიჩვენებდა წინააღმდეგობის იმ სიდიდეს, რომელიც მაკალიბრებელს გააჩნდა ის როგორც წესი 1%-ის სიზუსტით არ განსხვავდებოდა რეალურისაგან, ამის შემდეგ გამზომ უჯრედს გამოწმებდით კერძოდ:

ტერაომეტრის გამომყვან კაბელებს „rx“ „100v“ და „MKRAH“ მიაერთებენ თერმოსტატის შემყვანი იზოლატორების მომჭერებზე „ჟ“ „II“ და „K“. წინააღმდეგობის გადამრთველს თანდათანობით გადართავენ და თუ 60 წამის გავლის შემდეგ ისარი სტაბილურად გაჩერდება $\geq 10 \times 10^{13}$ ომი დანაყოფზე, გამზომი უჯრედი სუფთაა და შეიძლება მისი შევსება გამოსაცდელი ზეთის პორციით.

ტერაომეტრის გასწორების დილაკს YCT „∞“ დააყენებენ ზედა მდგომარეობაში, გათიშავენ ტერაომეტრის კაბელებს „rx“ და „100v“ თერმოსტატის გამომყვანებისაგან. გამოაღებენ გამზომ უჯრედს და შეავსებენ მას გამოსაცდელი ზეთის პორციით 40 სმ³. ჩადგამენ გამზომ უჯრედს თერმოსტატში, გამზომი ელექტროდის ჯიბეში ჩაუშვებენ თერმომეტრის ბოლოს და მიაერთებენ ყველა სადენს შესაბამის მომჭერებთან. როდესაც თერმოსტატში ტემპერატურა მიაღწევს მოცემულ სიდიდეს.

1.4. სატრანსფორმატორო ზეთის ტენშემცველობის განსაზღვრა

ტენშემცველობის განსაზღვრით ფასდება ელექტროსაიზოლაციო ზეთების მაღალი ძაბვის მოწყობილობებში ექსპლუატაციის შესაძლებლობა. ამ სიდიდის შედარებით შესაბამის ნორმატიულ დოკუმენტებთან [7] განისაზღვრება საიზოლაციო ზეთის ხარისხის მაჩვენებელი და ექსპლუატაციის პირობები.

ტენშემცველობის განსაზღვრა ხდება ანალიზური დანადგარის „ედი-2 M“-ის საშუალებით. გამოცდის დანადგარით შესაძლებელია სხვადასხვა მარკის სატრანსფორმატორო, და საკონდენსატორო ზეთების ტენშემცველობის განსაზღვრა, შესაბამისად, ნორმატიული დოკუმენტების [7] მოთხოვნებისა.

გამოცდის დანადგარი „ედი-2 M“ (ნახაზი N4) შედგება კვების ბლოკის (კ.ბ.) გამზომი გარდამსახის (ს.გ.) და ვაკუუმტუმბოსაგან (ვ.ტ.) კვების ბლოკის დანიშნულებათა უზრუნველყოფის სტაბილიზირებული ძაბვებით +36 ვ წნევათა სხვაობის დიფერენციალური გარდამსახი; +9ვ ანალოგიურ-ციფრული გარდამსახი და +24ვ ელექტრომაგნიტური სარქველები (k1-k5). კვების ბლოკის მიერთება 220 ვ. ცვლადი ძაბვის ქსელთან ხდება ჩამრთველით „ქსელი“ ინდიკაცია ხორციელდება წითელი ნათურით.

გამზომი გარდამსახის დანიშნულებათა გაზომოს გამოსაცდელი სითხიდან გამოყოფილი აირის და წყლის ორთქლის წნევა წყლის სვეტის მილიმეტრებში. იგი შედგება გამოსაცდელი ჭურჭლის (1) უკონტაქტო, მაგნიტური სარეველა - აქტივატორის (2) წნევათა სხვაობის დიფერენციალური გარდამსახის, დიფერენციალური მანომეტრის, ელექტრომაგნიტური სარქველების და მართვის პანელისაგან.

გამზომი-გარდამსახის მართვის პანელზე გამოტანილია შემდეგი საკომუტაციო-საზომი საშუალებანი: კვების დილაკ „220ვ“ შესაბამისი საინდიკაციო ნათურით, სარეველას ჩართვა დილაკი „აქტივატორი“ შესაბამისი საინდიკაციო ნათურით, ბრუნვათა რიცხვის რეგულირების პოტენციომეტრი სახელურით, მუდმივი დენის ციფრული ვოლტმეტრით 0-630 მვ, რაც შეესაბამება წნევათა ფარგლებს 0-630 მმ წყლის სვეტისა. ელექტრომაგნიტური სარქველების მართვის დილაკები შესაბამისი ფუნქციონალური დანიშნულებით:

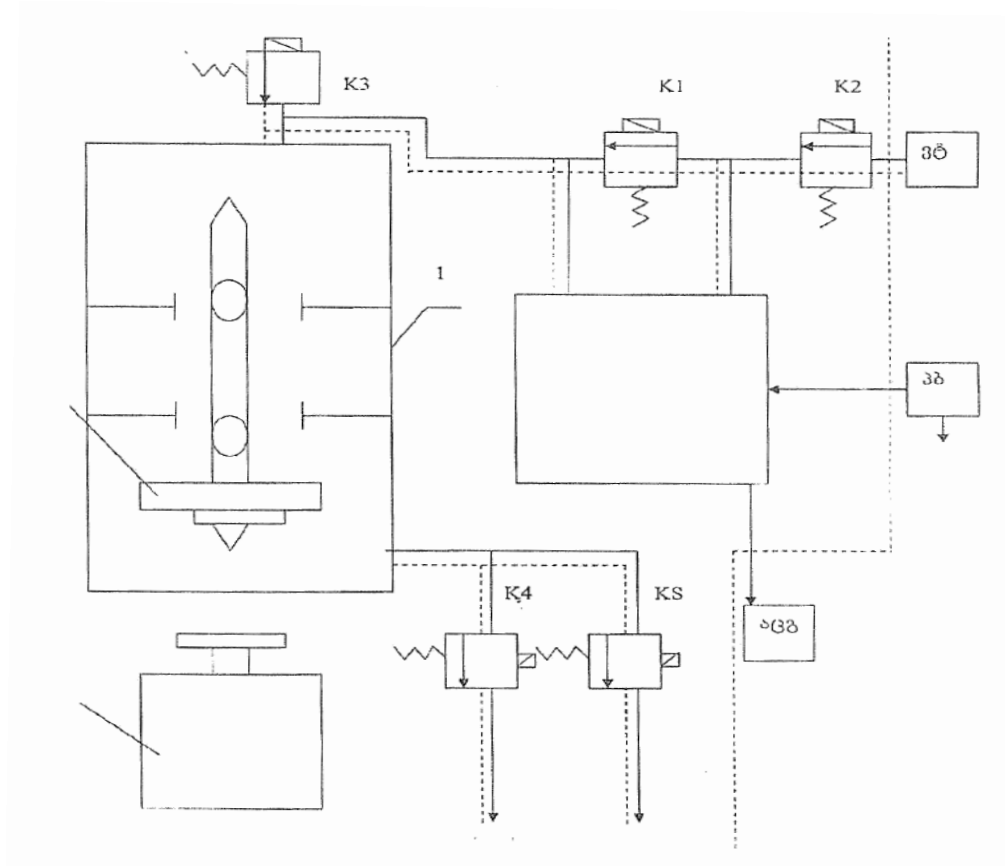
„ვაკუუმტუმბო“ - ნორმალურად ღია სარქველი.

„დიფ. მანომეტრი“ – (k1) ნორმალურად ღია სარქველი

„ზეთის შეშვება“ – (k4) ნორმალურად ჩაკეტილი სარქველი

„ატმოსფერო“ – (k3) ნორმალურად ჩაკეტილი სარქველი

„ზეთის ჩამოშვება“ – (k5) ნორმალურად ჩაკეტილი სარქველი



ნახაზი 4. გამოცდის დანადგარი „ედი-2 M“

ხელსაწყო ვაკუუმტუმბოსთან მიერთებულია ვაკუუმსადენის საშუალებით. ვაკუუმსადენის შუა ნაწილში დამონტაჟებულია ვაკუუმონკანი სისტემაში ჰაერის შესაშვებად. ფირფიტოვანი როტორული ვაკუუმტუმბო 3HBP -1D ტიპისა. $P_{მაქ} = 80$ მმ ვ.წყ.სვ.; $P_{მინ} = 1$ მმ ვ. წყ. სვ. მუშა ტემპერატურა - 10°C -დან $+35^{\circ}\text{C}$. ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა 80% მკვებავი ქსელის ძაბვაა $380\% \pm 10\%$. მოთხოვნილი სიმძლავრე 300 ვტ. ვაკუუმტუმბოს ძრავის მართვა ხორციელდება შესაბამისი საკომუტაციო აპარატის ჩართვის (თეთრი) და გამორთვის (შავი) ღილაკებით. გამოცდის დანადგარის კორპუსი მიერთებულია დამიწების კონტურთან.

გამოცდების შესრულების წინ უნდა მოხდეს დანადგარის შემოწმება, ამისათვის:

უნდა ჩაირთოს კვების ბლოკის გამზომი-გარდამსახის კვება და მცირე დაყოვნების შემდეგ გაიშვას „ვაკუუმტუმბო“. 2-3 წთ-ის შემდეგ ჩაირთოს ღილაკი k2 „ვაკუუმტუმბო“, რის შემდეგაც დანადგარის მთელს სისტემაში დამყარდება გარკვეული გაიშვიათება $P = 0.00 \div 0.01$. შემდეგ ჩაირთოს „დიფ. მანომეტრი“. ამით ერთმანეთისაგან გამოიყოფა დიფერენციალური მანომეტრის პლუს და მინუს კამერები. თუკი 1 წუთის განმავლობაში ციფრული მანომეტრის (ვოლტმენტრის) ჩვენება არ შეიცვალა, ეს ნიშნავს, რომ დანადგარის ვაკუუმსისტემა ჰერმეტიკულია და იგი მზადაა გამოცდის ჩასატარებლად.

თვეში ერთხელ, ან რაიმე გაუმართაობის შენიშვნის შემთხვევაში, ხორციელდება დანადგარის გამზომი სისტემის შემოწმება. ამისათვის:

წყლის მანომეტრის ერთ სვეტს რეზინის მილით, რომლის შუა ნაწილში მიერთებულია მინის გამყოფი ვაკუუმ-ჩამკეტი, მიაერთებენ დანადგარის ატმოსფეროსთან მიერთების მილთან. გახსნიან ვაკუუმტუმბოს წინ ვაკუუმ-ონკანს, ჩართავენ კვების ბლოკის და გამზომი-გარდამსახის კვების ჩამრთველებს. ჩართავენ ღილაკებს ბლოკის და გამზომი-გარდამსახის კვების ჩამრთველებს. ჩართავენ ღილაკებს „დიფ. მანომეტრი“ და „ატმოსფერო“, ხოლო ღილაკები ვაკუუმტუმბო, ზეთის შეშვება და ზეთის ჩამოშვება გამორთული უნდა იყოს.

წყლის მანომეტრის და გამზომი-გარდამსახის ატმოსფეროს მილთან შეერთებული რეზინის მილის ვაკუუმური საკეტის გახსნით და შერევით მიიღებენ წყლის მანომეტრის მუშა სვეტის წნევას 10 მმ წყლის სვეტისა, ჩაკეტავენ ვაკუუმჩამკეტს. თუ დანადგარის ციფრიანი მანომეტრის ჩვენება იგივე იქნება, რაც მანომეტრის, ანალოგიურ გაზომვებს ჩაატარებენ 50, 100, 200 და 300 მმ. წყლის სვეტის წნევის დროს. იმ შემთხვევაში თუ კი სხვაობა შეინიშნება, ახდენენ დანადგარის ციფრული მანომეტრის კორექტირებას შესაბამისი პოტენციომეტრით. დანადგარის შემოწმება-კორექტირების

შემდეგ ყველა საკომპუტაციო და ვაკუუმისტიკის ონკანები დაბრუნებული უნდა იქნეს საწყის მდგომარეობაში. ყველა საკომპუტაციო ღილაკი და ვაკუუმ-ტუმბო უნდა იყოს გამორთული, ხოლო ვაკუუმ-ონკანი ღია.

სატრანსფორმატორო ზეთის გამოცდა შემდეგნაირად მიმდინარეობს: გამოსაცდელი ზეთის ნიმუშიან ბოთლებში ჩაიდგმება ზეთის შეშვების მილი. ჩაიკეტება ვაკუუმონკანი. ჩაირთვება კვების ბლოკის გამზომ--გარდამსახის კვების ჩამრთველები და დაყოვნდება 20 წთ. ზეთის მილები და გამოცდის ჭურჭელი უნდა გამოირეცხოს გამოსაცდელი ზეთით. ამისათვის თეთრი ღილაკით გაშვებული უნდა იქნას ვაკუუმტუმბო და ღილაკი „ზეთის შეშვება“ მცირე დოზით 5 წმ-იანი ჩართვით. შეყვანილ იქნას ზეთის მცირე პორცია ჭურჭელში, გამოირთოს ზეთის შეშვების ღილაკი. შემდეგ კი უნდა ჩამოიკალოს ზეთი ჭურჭლიდან. ამისათვის თანმიმდევრობით ჩავრთავთ ღილაკებს: „ვაკუუმტუმბო“, „ატმოსფერო“, „ზეთის ჩამოშვება“ და დავაცადოთ, სანამ ჭურჭელი სულ არ დაიცლება ზეთისაგან. შემდეგ კი იგივე ღილაკებს უკუმიმდევრობით ვაბრუნებთ საწყის მდგომარეობაში. ჭურჭელში შეიქმნება გაიშვიათება, რომელმაც უნდა მიაღწიოს $P_{\min} = 0.00 \div 0.01$ მმ წყლის სვეტს. ამის შემდეგ მიმდევრობით ჩავრთავთ „ვაკუუმტუმბოს“, „დიფ მანომეტრს“ და „ზეთის შეშვებას“ და ჭურჭელში ზეთს შევუშვებთ ნიშნულამდე. თუკი შეშვების დროს დაიწყოს ზეთის აქაფება, ღილაკის იმპულსური ჩართვა-გამორთვისას ფრთხილად უნდა შევუშვათ ზეთი ჭურჭელში. ღილაკი „აქტივატორი“ ჩავრთავთ სარეველას. დაიწყება ზეთიდან აირების გამოყოფა. როცა წნევა მაქსიმუმს მიაღწევს ციფრულ მანომეტრზე ავითვლით $P = P_{\text{ავ}}$ მნიშვნელობას. შემდეგ გამოვართოთ „აქტივატორი“. „დიფ მანომეტრი“ „ვაკუუმტუმბო“ და დავიცადოთ ზეთის სრულ დაწყნარებამდე. უნდა შეწყდეს ზეთიდან აირბურთულების გამოყოფა. წნევა უნდა გახდეს $P_{\min} = 0.00 \div 0.01$. ისევე უნდა ჩაირთოს თანმიმდევრობით „ვაკუუმტუმბო“, „დიფ მანომეტრი“ და „აქტივატორი“. ისევ დაიწყება ზეთიდან აირების გამოყოფა და მანომეტრზე ავითვლით $P_2 = P_{\text{ავ}}$ მნიშვნელობას. გამოვართოთ „აქტივატორი“, „დიფ

მანომეტრი“ და ლილაკი „ატმოსფერო“-ს ჩართვით სისტემა შევადართოთ ატმოსფეროსთან, ხოლო ლილაკით „ზეთის ჩამოშვება“ ჩამოვუშვათ ზეთი გამოსაცდელი ჭურჭლიდან. გამოვართოთ შავი ლილაკით ვაკუუმტუმბო, შემდეგ ლილაკი „ვაკუუმტუმბო“ და გავალოთ ვაკუუმონკანი. ჭურჭლიდან ზეთი სრული დაცლის შემდეგ დანადგარის ვაკუუმონკანი და ყველა საკომუტაციო ლილაკი დაყენებულ უნდა იქნას გამორთულ მდგომარეობაში.

ანალოგიური გამოცდა ჩატარებულ უნდა იქნას იგივე ნიმუშის მეორე პორციისათვის. თუ ორი გამოცდის შედეგები არ აკმაყოფილებს ცდომილების ნორმებს ორ გამოცდას შორის, მაშინ უნდა ჩატარდეს მესამე გამოცდა. „ედი-2 M“-ით ტენშემცველობის განსაზღვრისას ძირითადი ცდომილება არ უნდა აღემატებოდეს $\pm 10\%$ -ს თუ გარემომცველი ჰაერის ტემპერატურა იცვლება $+ 10^{\circ}\text{C}$ -დან $+ 40^{\circ}\text{C}$ -მდე, ტენიანობა კი $30\text{-}80\%$ -ის ფარგლებში.

ორი ცდის ჩატარების შემთხვევაში საბოლოო შედეგად მიიღება ტენიანობის (W) საშუალო მნიშვნელობა შესაბამისი ცდომილების ფარგლების გათვალისწინებით. ტენშემცველობა განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულები:

$$W = (88.7P_2 - 4.62P_1) \times 862 \times 10^{-5} \text{ (გრ/ტ)} \quad (12)$$

იმ შემთხვევაში თუ $P_1 \geq 150$ მმ წყლის სვეტისა, მაშინ

$$W = \frac{88.7P_2}{100} \text{ (გრ/ტ)} \quad (13)$$

1.5. სატრანსფორმატორო ზეთის მექანიკური მინარევის შემცველობის დადგენის მეთოდი

მექანიკური მინარევის შემცველობის განსაზღვრით და მისი შედარებით შესაბამის ნორმატიულ-ტექნიკურ დოკუმენტებთან, ფასდება ზეთის ხარისხი, მაჩვენებელი და მისი ვარგისიანობა ექსპლუატაციისათვის.

მექანიკური მინარევების შემცველობის მიხედვით სისუფთავის კლასის დასადგენად გამოიყენება მიკროპროცესორული ფოტომეტრული ანალიზატორი - A03-101. იგი გამოიყენება, როგორც ახალი, ისე ექსპლუატაციაში მყოფი სატრანსფორმატორო, საკონდესატორო და საკაბელო ზეთებისათვის. გაზომვის დიაპაზონი მოიცავს სისუფთავის კლასის დადგენას $0 \div 17$ სტანდარტით დადგენილ პირობით ერთეულებში მექანიკური მინარევების შემცველობის მიხედვით ნორმატიული დოკუმენტების [8] მოთხოვნების შესაბამისად გამოსაცდელი ზეთის ტემპერატურა უნდა იყოს $10 \div 40^{\circ}\text{C}$ -ის ფარგლებში, სიბლანტე კი - არაუმეტეს 150 სსტ. ანალიზატორი შედგება შემდეგი ბლოკებისა და საკომუტაციო მოწყობილობებისაგან:

ოპტიკური ბლოკი წარმოადგენს გამდინარე კიუვეტაში ჩამონტაჟებულ ფოტომეტრულ მთვლელ-გარდამსახს. მისი მართვა ხორციელდება ჩამრთველით. „Колибратор“ შესაბამისი წითელი სასიგნალო ნათურით. რეგულირება ხდება პოტენციომეტრებით „Чувствительность“, რომლებიც განლაგებულნი არიან ბლოკის სახურავზე და ბლოკის პანელზე მიკროამპერმეტრის ზემოთ. ბლოკის პანელზეა სახედი ფანჯარა გამოსაცდელი სითხის მოძრაობაზე დაკვირვებისათვის.

დოზატორის ბლოკი, რომლის დანიშნულებაცაა საანალიზო ზეთის შეწოვა, დოზირება და გატარება გამდინარე კიუვეტში და მთელს ჰიდროსისტემაში. მისი მართვა ხორციელდება ჩამრთველით „сеть“, ხოლო ინდიკაცია „ГОТОВ БД“ ნათურით, ზეთის სინჯის დოზების გადამრთველით - „инъем“ 10-დან 100 სმ³-ის ჩათვლით, ტუმბოს გაშვების დილაკებით „ОТСОС“ და СЛИВ“ ანალიზატორში გატარებული ზეთის მოცულობის ციფრული ინდიკაციით.

ელექტრონული ბლოკი წარმოადგენს სერიულ ანალიზატორს АИ-7-ს, რომლის დანიშნულებაცაა ოპტიკური ბლოკიდან იმპულსების ათვლა, გაძლიერება და ციფრის საბეჭდ მოწყობილობაზე გადაცემა. მისი მართვა ხორციელდება ჩამრთველით „сеть“ და ინდიკატორით „счеть“. ამ ბლოკით

ხდება აგრეთვე ანალიზატორის კალიბრირება და აწყობა სარეგისტრაციო არხების მიხედვით წრიული გადამრთველის მაჩვენებელი მიუთითებს შვიდიდან რომელი არხის კალიბრირება ხორციელდება. გადამრთველით „Печать“ ხდება შედეგების დაბეჭდილი ეგზემპლარების ცვლა.

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

ციფრის საბეჭდი მოწყობილობის დანიშნულებაა გამოცდის შედეგების გამობეჭდვა ქალაქდზე გარკვეული მოცულობის ზეთში ნაწილაკების ჯამური რაოდენობის და ზომათა შვიდი დიაპაზონის მიხედვით.

ზეთის გარკვეული რაოდენობა გატარდება გამდინარე კიუეტაში, რომელიც აღჭურვილია სინათლის მიმართული ნაკადით და ფოტომეტრული მთვლელით. ზეთში შეწონილი ნაწილაკების კიუეტის 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 ქალაქდზე დაბეჭდილი ინფორმაცია, რომელიც შეიცავს გატარებული ზეთის 10-დან 1000 სმ³ მოცულობაში, მექანიკური ნაწილაკების სრულ და ზომების მიხედვით რაოდენობას. სპეციალური სტანდარტული ცხრილის მეშვეობით, ნაწილაკთა გარკვეული ზომის და მათი რიცხვის მიხედვით განისაზღვრება გამოცდილი ზეთის სისუფთავის კლასი.

გამოცდის შესრულების მომზადებისას ამოწმებენ ანალიზატორის ჰიდროსისტემას და აზუსტებენ მგრძნობიარობას. ამისათვის გამოიყენება მაკალიბრებელი, უაღრესად სუფთა სატრანსფორმატორო ან საკონდენსატორო ზეთი სისუფთავის 5-6 კლასით. ანალიზატორის ჰიდროსისტემის შემოწმება მოიცავს: ჰიდროსისტემაში მაკალიბრებელი ზეთის შეშვებას, ჰაერის გამოდევნას და ჰერმეტიულობის შემოწმებას. ანალიზატორის კალიბრირება უნდა მოხდეს წელიწადში ერთხელ

ნორმატიული დოკუმენტების [9] მოთხოვნების შესაბამისად. ჰიდროსისტემის შემოწმება 3 თვეში ერთხელ, ხოლო მგრძობიარობის შეწყობა-დაზუსტება ყოველი გამოცდის წინ. გარდა ამისა, უნდა მოხდეს ჰიდრო სისტემის გარეცხვა ბენზინით „გალომა“ ან ქიმიურად სუფთა ტოლუოლით, განსაკუთრებით ძლიერ ჭუჭყიანი ზეთების გამოცდის შემდეგ.

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 ბლოკების 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, მაგ: 10 სმ³ – „0“ 10 სმ³– „1“ და ა. შ. თუ დოზატორის ბლოკზე ანთია ინდიკატორი „ГОТОВ БД“ ღილაკის „ОТСОС“ დაწერით დაიწყება ჭიქიდან ზეთის შეწოვა-გამოცდის პროცესი. იმ შემთხვევაში თუ ეს ინდიკატორი არ აინთო, დავაჭიროთ ღილაკზე „СЛИВ“ და როცა ჰიდროსისტემაში ნარჩენი ზეთი გადაიღვრება, ჩაქრება ინდიკატორი „СЛИВ“ და აინთება ინდიკატორი „ГОТОВ БД“. ღილაკზე „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 გამდინარე კიუვეტაში და ჩაქრება ინდიკატორი „OTCOC“. ამის შემდეგ, მუშაობას იწყებს ციფრსაბეჭდი მოწყობილობა ქალაქდზე დაიბეჭდება 100 სმ³ მოცულობის ზეთში შეწონილი ნაწილაკთა ჯამური და მათი ზომების მიხედვით რაოდენობები შესაბამისი პროცენტული მაჩვენებლებით. მაგალითად (ცხრილი N2).

ცხრილი 2. 100 გრ. ზეთში შეწონილი ნაწილაკების განაწილება ზომების და % რაოდენობის მიხედვით

Σ	506789	100%
1.2÷5 მკმ	415197	81.90%
5÷15 მკმ	88272	17.40%
15÷25 მკმ	2836	0.60%
25÷50 მკმ	384	0.10%
50÷100 მკმ	82	0.00%
100÷200 მკმ	7	0.00%
200÷500 მკმ	1	0.00%

გამოცდის დამთავრების შემდეგ ანალიზატორი უნდა გამოირეცხოს. შედეგების მიღების შემდეგ სტანდარტულ ცხრილში იპოვიან პწკარს, რომელიც შეესაბამება 5÷500 მკმ ზომის ნაწილაკების ჯამურ რაოდენობას 100 სმ³ ზეთის მოცულობაში. მის გასწვრივ აითვლება სისუფთავის კლასის პირობითი მაჩვენებელი. მაგალითად: მიღებული შედეგების მიხედვით 5 მკმ ნაწილაკთა რიცხვი შეადგენს 91600. ე. ი. გამოცდილი ზეთის სისუფთავის კლასია 12 (64000 – 130000) შესაბამისი ნორმატიული დოკუმენტის [8] მიხედვით.

ანალიზატორ - A03-101-ით მექანიკური მინარევების შემცველობის მიხედვით მექანიკური ნაწილაკების რაოდენობის დადგენისას ძირითადი ცდომილება არ აღემატება $\pm 5\%$ -ს.

1.6. ტრანსფორმატორის ზეთის მინარევებისგან გაწმენდის მეთოდი

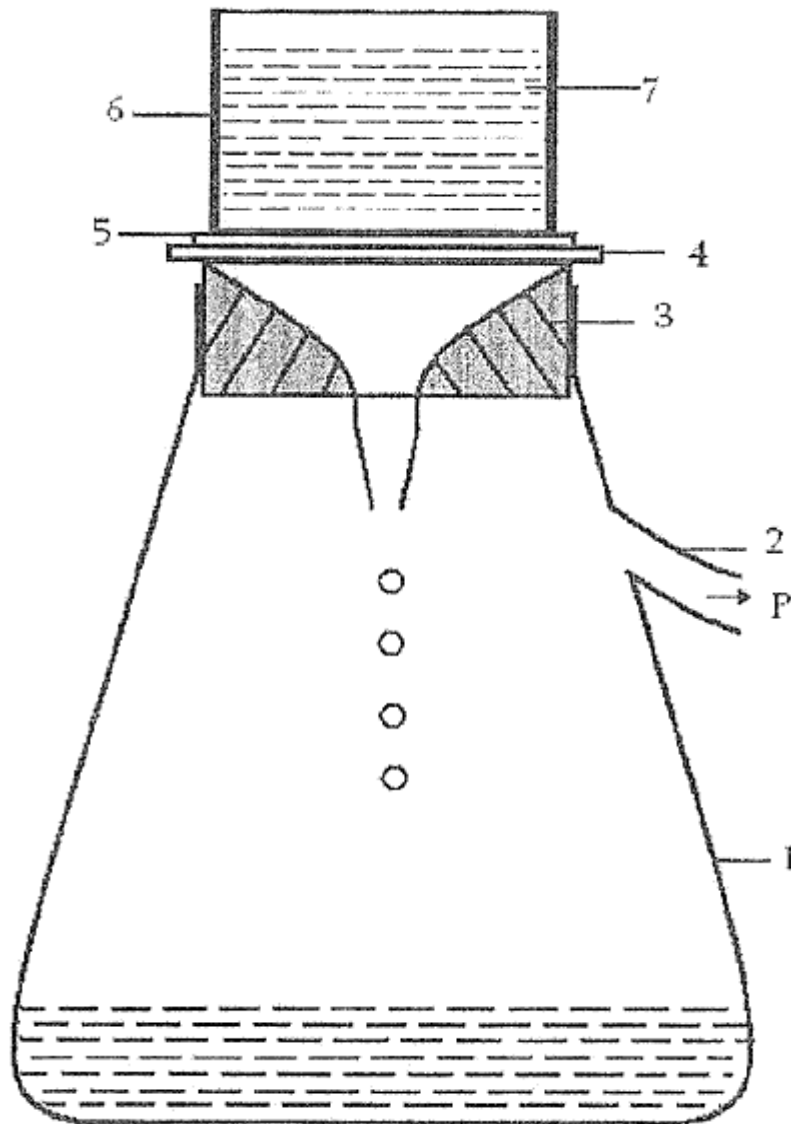
ექსპლუატაციაში ნამყოფი ზეთები სხვადასხვა სახის მექანიკურ მინარევებს ტენს და აირჩანართებს შეიცავენ, რომელთა ზეთისგან გამოსაყოფად ჩვენს მიერ დამზადებული იყო შემდეგი სახის საფილტრავი მოწყობილობა ნახაზი N5, რომელიც შედგება სპეციალური კოლბისაგან (1), რომელსაც გააჩნია ვაკუუმურ სისტემასთან შესაერთებელი მილი (2). კოლბას თავზე ვაკუუმშიდროდ დაცული აქვს საცობი (3), რომლის თავზეც დამაგრებულია სპეციალური ბადე ფილტრი ქაღალდის შესაკავებლად (5) და ამ საცობს მექანიკურად დამაგრებული აქვს ჭიქა (6), რომელშიც ისხმება გასაფილტრი ზეთი (7).

ვაკუუმის მოქმედებით ზეთი გაივლის ფილტრის ქაღალდში და ჭურჭელში ჩაედინება, ხოლო მექანიკური მინარევები ფილტრის ქაღალდზე რჩებიან, ამასთანავე ვაკუუმთან ერთად გაიწოვება ზეთში არსებული წყლის ტენი და აირჩანართები, ე. ი. გაფილტვრასთან ერთად ხდება ზეთის დეგაზაცია და მისგან წყლის მოშორება.

ზეთის გასუფთავების ხარისხს ჩვენ გამოწმედით შესაბამისი ხელსაწყოებით.

ზეთის გასაფილტრად გამოვიყენეთ ფილტრის ქაღალდი დამზადებული პოლივინილქლორიდის ფუძეზე. უჯრედის ზომებით 0.25 მკმ, რაც ნიშნავს, რომ ამაზე პატარა ნაწილაკების გამოყოფა ზეთიდან შეუძლებელი იყო. უნდა აღინიშნოს, რომ საექსპლუატაციო ზეთებში მინარევების შეფასებას ან სისუფთავის კლასის დადგენას სტანდარტი ითვალისწინებს იმ ნაწილაკებს, რომელთა ზომებიც 1 მიკრონს აღემატება.

როდესაც საჭირო იყო ზეთი გაგვეფილტრა მხოლოდ მექანიკური ნაწილაკებისაგან და გაგვეგო ტენისა და აირჩანართების გავლენა, მაშინ ვაკუუმტუმბოს გარეშე ზეთი თავისუფალი გადინებით იფილტრებოდა.

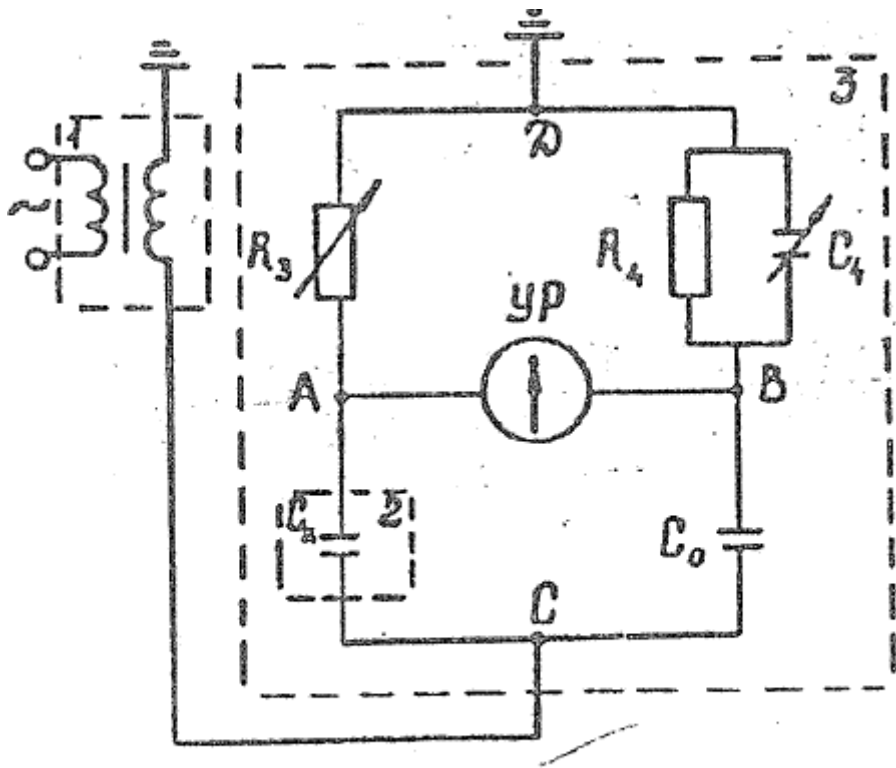


ნახაზი 5. ტრანსფორმატორის ზეთის გასაფილტრი მოწყობილობა

ერთი ბოლო დამიწებულია, ხოლო მეორე ბოლოთი მაღალი ძაბვა ეწოდება გამზომი ბოგირის (3) C - წერტილს ნახაზი (7).

მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორად გამოყენებულია HOM-10 ტიპის მზომი ტრანსფორმატორი. მაღალი ძაბვის სიდიდის გაზომვა და მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორის დაგრაღუირება ხდება C 196 ტიპის ელექტროსტატიკური კილოვოლტმეტრით, რომლის გაზომვის ცდომილება

$\pm 2\%$ არ აღემატება. C წერტილში აგრეთვე შეერთებულია ეტალონური კონდენსატორის C_0 ის ერთი ბოლო, რომლის ტიპია P5023.



ნახაზი 6. შერინგის ბოგირის P5026M პირდაპირი სქემა

მეორე ბოლო კი დაკავშირებულია გამზომი სქემის B - წერტილს. აქვე C-წერტილთან შეერთებულია გამზომი უჯრედის (2) მაღალი ძაბვის ელექტროდი. ამ უჯრედის დაბალი ძაბვის ელექტროდი კი მიერთებულია A წერტილს. ამდაგვარად უჯრედი ქმნის C_x ტევადობას, რომელიც მოთავსებულია თერმოსტატში და მისი ტემპერატურის გაზომვა და რეგულირება იმავე სქემით და მეთოდით ხდება, რაც ტრანსფორმატორის ზეთის წინააღმდეგობის გაზომვისას. A - წერტილს აგრეთვე მიერთებული აქვს D-წერტილთან მისაერთებელი R_3 - ცვლადი სიდიდის წინააღმდეგობა. B-წერტილს უკავშირდება ერთმანეთთან პარალელურად ჩართული R_4 - მუდმივი წინააღმდეგობის მქონე რეზისტორი და C_4 -ცვლადი ტევადობის მქონე

კონდენსატორი, რომლებიც ასევე დაკავშირებულნი არიან ელექტრულად D- წერტილთან და ისინიც დამიწებულნი არიან. მთელი ეს სისტემა მოთავსებულია სამმაგ ელექტროსტატიკურ ეკრანში და D- წერტილთან ერთადაა დამიწებული.

A და B წერტილებს შორის ჩართულია სპეციალური ნოლინდიკატორი, რომელიც გვიჩვენებს A და B წერტილებს შორის პოტენციალთა სხვაობის სიდიდეს. როდესაც C, A, D- წრედის წინააღმდეგობა უტოლდება C, B, D - წრედის წინააღმდეგობას და C_x - ტევადობას (გამოსაკვლევ ტევადობას) იგივე მახასიათებლები აქვს, რაც R_4 და C_4 -ს, მაშინ A-B წერტილებს შორის ჩართული YP- ტიპის ნოლინდიკატორი 0-ს გვიჩვენებს, ხოლო C_4 ცვლადი ტევადობა და R_4 წინააღმდეგობა ისე არის შერჩეული, რომ C_4 -ი გვიჩვენებს C_x კონდენსატორში დანაკარგების სიდიდეს. გაზომვის წინ უნდა დავრწმუნდეთ, რომ უჯრედი მოთავსებულია მეტალის დამცავ ლობურაში, რომელიც მიერთებულია 3 მმ² სისქის ფოლადის მავთულით დამიწების კონტურთან. აგრეთვე ლობურის კარებს გააჩნია საიმედო ბლოკირება, რადგან გაზომვის პროცესის მიმდინარეობისას კარების უეცარი გაღება უნდა გამორიცხავდეს ძაბვის ქვეშ პერსონალის მოხვედრას. გაზომვა ტარდება წინასწარ გამზადებულ და შემოწმებულ გამომშრალ გამზომ უჯრედს, რომელსაც რამოდენიმეჯერ გამოავლებენ გამოსაკვლევ ზეთს, რომლის შემდეგ მასში ჩაასხამენ ტრანსფორმატორის გამოსაკვლევ ზეთს 40 სმ³ მოცულობის ოდენობით. უჯრედს შედგამენ თერმოსტატის თაროზე, მიუერთებენ ელექტროდთა სისტემას და სათანადო ტემპერატურას დაამყარებენ, 10 წთ-ის შემდეგ ზომავენ $t_{გდ}$ -ს ოთხ-ოთხი მნიშვნელობისა და საშუალო არითმეტიკულით იანგარიშება $t_{გდ}$ -ს სიდიდე მოცემულ ტემპერატურაზე. აღსანიშნავია ისიც, რომ განსხვავება გაზომვის მაქსიმალურ და მინიმალურ მნიშვნელობებს შორის არ უნდა აღემატებოდეს 0.2%-ს თუ ეს ცდომილება არსებობს, მაშინ გაზომვის უჯრედს თავიდან ასუფთავებენ ან ითვალისწინებენ უჯრედის $t_{გდ}$ -ს სიდიდეს. თუ სპეციალური მითითება არ არის გაზომვის ჩატარების მიზნით გაზომვას

ჯერ ატარებენ ყველაზე მცირე ტემპერატურაზე, ხოლო შემდეგ მაღალ ტემპერატურაზე.

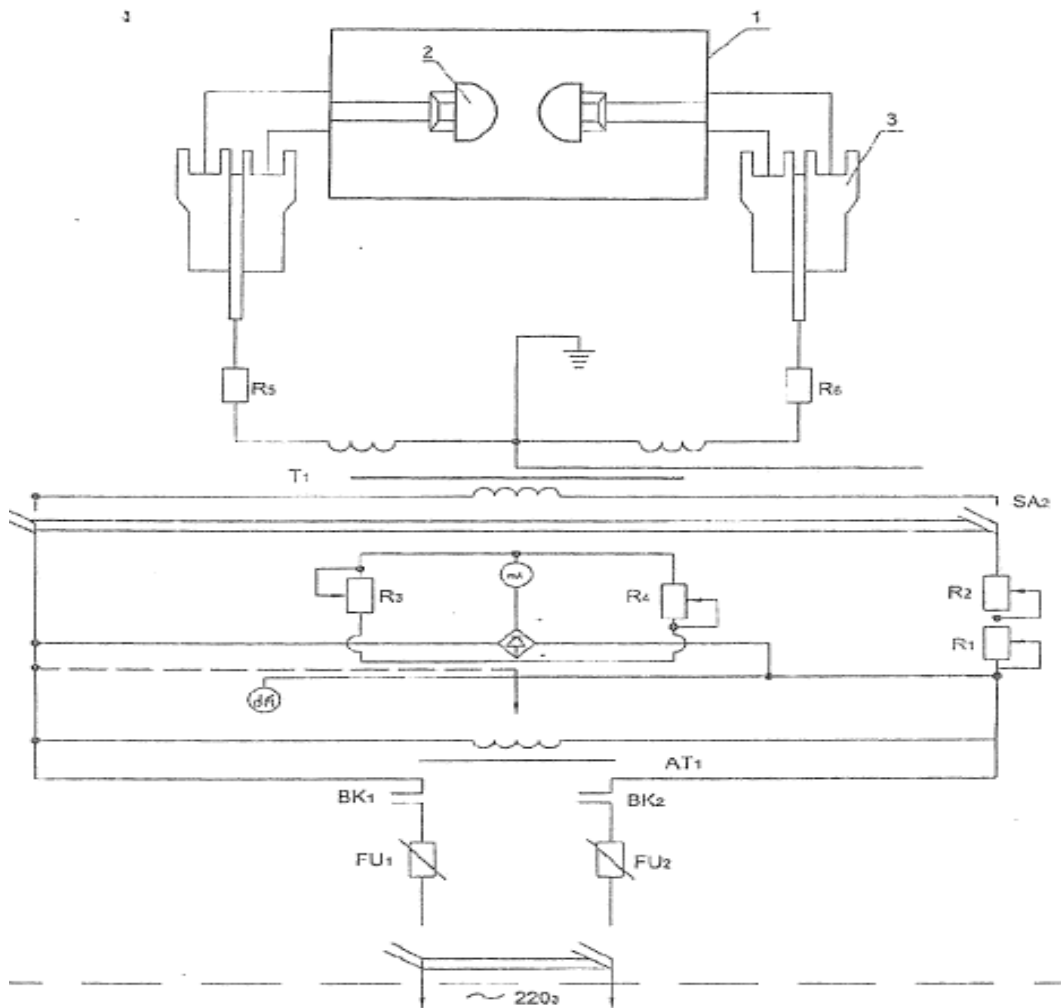
როგორც აღვნიშნეთ გაზომვის უჯრედი სპეციალურ მომზადებას განიცდის. ამ მიზნით ხდება მისი გარეცხვა და tგდ-ს სიდიდის დადგენა, თუ tგდ-ს სიდიდე 0.0052 ± 0.0001 -ზე ნაკლები არის, მაშინ მის სიდიდეს გაზომვის პროცესისას არ ითვალისწინებენ, ხოლო თუ ის აღნიშნულ სიდიდეს აღემატება, მაშინ სასურველია მიღებულ სიდიდეს გამოაკლდეს უჯრედის tგდ, მაგრამ ეს გაზომვის ცდომილებას ადიდებს.

1.7. სატრანსფორმატორო ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდის დადგენა

სანტრანსფორმატორო ზეთის გამრღვევი ძაბვის სიდიდის დადგენით ფასდება მისი ხარისხის მაჩვენებელი და ამ სიდიდის შესაბამისობა ნორმატიული დოკუმენტების [9] მოთხოვნებთან, ისაზღვრება ზეთის ექსპლუატაციის პირობები ან მისი ვარგისიანობა ექსპლუატაციისათვის.

გაზომვის დიაპაზონი მოიცავს $5 \div 90$ კვ. ცვლადი ძაბვის სიდიდის გარემოს $13 \div 35^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურის, 80% ფარდობითი ტენიანობის და $630 \div 800$ მმ. ვწყ. სვ. გარემომცველი პირობების დროს. გაზომვის შესრულება ხდება 50 ჰერცი სიხშირის ცვლადი დენით АИМ-90 აპარატის საშუალებით. იგი გამოიყენება სხვადასხვა მარკის საიზოლაციო სითხეებისათვის (ტრანსფორმატორის, კონდენსატორის, კაბელის ზეთები) როგორც ახალი, ისე საექსპლუატაციო, აგრეთვე სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოების შესასრულებლად.

გამოცდის აპარატი АИМ-90 წარმოადგენს მეტალის გარსაცმში დამონტაჟებულ მოწყობილობა (ნახაზი N7). იგი შედგება შემდეგი ძირითადი ნაწილებისაგან: გენერატორული მოწყობილობა, ძაბვის რეგულატორი, გამზომი უჯრედი (1) და მარეგულირებელ-გამზომი ბლოკის მართვის პანელი.



ნახაზი 7. AIM-90 ტიპის დანადგარის ელექტრული სქემა

მარეგულირებელ-გამზომ ბლოკის მართვის პანელზე დამონტაჟებულია: გამრღვევი ძაბვის გამზომი ხელსაწყო (მილიამერმეტრი შკალით 10 mA, რომელიც გრადუირებულია 1 mA-10 KV). აპარატის 220 ვ. ქსელში ჩართვის „~“ შესაბამისი ყვითელი სასიგნალო ნათურით. ამაღლებული ძაბვის ჩართვის „⚡“ ღილაკი წითელი. სასიგნალო ნათურით. ღილაკის „ 0 ← “ ჩართვით ხდება გამრღვევი ძაბვის ფიქსირება, შემდეგ ხელსაწყოს ისარის საწყის მდგომარეობაში დაბრუნება ღილაკით „ 0 ⇨ “ გარღვევის ფიქსირების შემდეგ ისრის ნულამდე ავტომატური დაბრუნება.

ღილაკით „ _ _ “ ხდება ძაბვის ამაღლების შეწყვეტა. აპარატის უკანა კედელზე დამონტაჟებულია 220 ვ ქსელთან მისაერთებელი კაბელი და ჩამიწების მომჭერი. აპარატის ზედა ნაწილში სახედი-მაბლოკირებელი

ფანჯრის ქვეშ დამონტაჟებულია გამომყვანი იზოლატორები (3), რომლებზედაც დადგმულია გამზომი უჯრედი (1). გამზომი უჯრედი წარმოადგენს დიელექტრიკულ ჭურჭელში ჩამაგრებულ ორ ნახევრად სფერული თითბერის ელექტროდს (2) მათ შორის სტანდარტული მანძილით 2.5-0.05 მმ. აპარატის ზუსტი გრადუირებისათვის გამოიყენება ჰორიზონტალური განლაგების სფერული ($D = 125$ მმ) მცლელები, რომლებიც აკმაყოფილებს სტანდარტის [10] მოთხოვნებს, ხოლო საკონტროლო შემოწმებისათვის გამოიყენება ნახევრად სფერული საინდიკატორო მცლელი. ($D = 37.8 \pm 0.2$ მმ), რომელიც იდგმება უშუალოდ აპარატში. გამზომი უჯრედის ელექტროდებს შორის მანძილის შემოწმებისათვის გამოიყენება ფოლადის მაკალიბრებელი შაბლონი, რომლის ერთი ბოლო ნომინალური სისქით 2.4 მმ უნდა გადიოდეს ელექტროდებს შორის, ხოლო მეორე ბოლო ნომინალური სისქით 2.55 მმ არ უნდა გავიდეს ელექტროდებს შორის. გარღვევის შემდეგ ელექტროდებიდან ჭვარტლის მოსაცილებლად ფოლგირებული გეტინაქსის მინის საცეცელი გამოიყენება. გამზომი უჯრედის მომზადებისათვის გამოიყენება ელექტროდების ზედაპირების გამაპრიალებელი მოწყობილობა. ხოლო თვითონ ჭურჭლის გასარეცხად გამოიყენება სხვადასხვა გამხსნელები: პერტოლიუმის ეთერი, ტოლუოლი, აცეტონი.

АИМ-90-ით სატრანსფორმატორო ზეთის გამრღვევი ძაბვის დადგენამდე აპარატი უნდა მომზადდეს გაზომვისათვის. ვიზუალური დაკვირვებით უნდა შემოწმდეს: აპარატის საკომმუტაციო საშუალებების გამართულობა, ჩამიწების გამტარის შეერთება დამიწების კონტურთან. აპარატს მიაერთებენ 220 ვ კვების წყაროსთან. დახურავენ სახედ-მაბლოკირებელ ფანჯარას და ჩართავენ ღილაკს „~“. აინთება ყვითელი სასიგნალო ნათურა. თუ ფანჯრის გაღებისას ყვითელი სასიგნალო ნათურა ჩაქრა, აპარატის ბლოკირება ფუნქციონირებს. გამორთავენ კვების ღილაკს „~“ გააღებენ ფანჯარას და მაღალი ძაბვის გამომყვანებზე დააყენებენ საკონტროლო-საინდიკატორო მცვლელს, რომლის ელექტროდებს შორის მანძილი 5 მმ-ია. დახურავენ

სახედ ფანჯარას. ჩართავენ ღილაკს „~“ შემდეგ ღილაკის „↔“ ჩართვით მიაწოდებენ მაღალ ძაბვას სფერულ ელექტროდებს საჰაერო შუალედის გარღვევამდე, აითვლიან $U_{გაბ}$ და ღილაკით „0 ←“ დააბრუნებენ ხელსაწყოს ისარს ნულოვან დანაყოფზე. ცდას ჩაატარებენ 3-ჯერ და დაადგენენ $U_{გაბ}$ (საშ) მნიშვნელობას. ჰაერის ფარდობითი სიმკვრივის σ -ს გათვალისწინებით.

ანალოგიურ ცდას ჩაატარებენ, როცა ელექტროდებს შორის მანძილია 10,15,20 მმ. დაადგენენ საშუალო გამრღვევ ძაბვებს σ -ს გათვალისწინებით. თუ $U_{გაბ}$ მიღებული სიდიდეები ემთხვევა საკონტროლო საინდიკატორო მცლელის ცხრილის მონაცემებს $\pm 15\%$ ცვლილების ფარგლებში, აპარატი მზადაა გაზომვების ჩასატარებლად. ასეთი გამოცდები ტარდება თვეში ერთხელ ან მაშინ თუ შეინიშნება გარკვეული ხარვეზები გამოცდების მიმდინარეობისას. აპარატის ზუსტ გრადუირებას ჰორიზონტალური განლაგების სფერული მცვლელელებით ახდენენ სტანდარტის [10] მოთხოვნების მიხედვით, წელიწადში ერთხელ ან აპარატზე სერიოზული სარემონტო სამუშაოების ჩატარების შემდეგ. საკონტროლო შემოწმების ჩატარების შემდეგ ღილაკებს დააბრუნებენ საწყის მდგომარეობაში.

გაზომვებისთვის გამზომი უჯრედიც უნდა მომზადდეს. ელექტროდების ზედაპირებს გააპრიალებენ ისე, რომ ზედაპირების ხორკლიანობა შეესაბამებოდეს სისუფთავის 9 კლასს. ელექტროდებსაც და გამზომ უჯრედსაც გამორეცხავენ პეტროლიუმის ეთერით, შემდეგ აცეტონით და გაამშრალევენ სუფთა ნაჭრით. დიელექტრიკულ ჭურჭელში ჩამონტაჟებენ ელექტროდებს ისე, რომ მათი ცენტრები ემთხვეოდეს ერთმანეთს. მაკალიბრებელი შაბლონით დააყენებენ ელექტროდებს შორის მანძილს 2.5 მმ. შაბლონის მეორე ბოლოთი შეამოწმებენ ელექტროდებს შორის მანძილს. შაბლონმა არ უნდა გაიაროს ელექტროდებს შორის.

გაზომვის შესრულება შემდეგნაირად წარმოებს: ზეთის პორციას გამოავლებენ, აავსებენ უჯრედს მოცულობის ნიშნულამდე. უჯრედს ჩადგამენ აპარატში, დახურავენ სახედ-ფანჯარას და დააყოვნებენ 10 წთ-ს,

ჩართავენ ქსელის მიერთების ღირებულებას „~“. აინთება ყვითელი სასიგნალო ნათურა. თუ გამზომი ხელსაწყო ისარი გადახრილია ნულიდან, მისი დაბრუნება საწყის მდგომარეობაში ხდება ღირებულებით „0 ←“. ამის შემდეგ უჯრედს მიაწოდებენ ამალეებულ ძაბვას ღირებულებით „↖“ უჯრედს ამალეებულ ძაბვას აწოდებენ ზეთის შუალედის სრულ გარღვევამდე. ამ დროს ანთია წითელი სასიგნალო ნათურა. ზეთის გარღვევისას ჩაქრება წითელი ნათურა. ისარი ფიქსირდება სკალის რომელიმე დანაყოფზე. ხელსაწყოზე აითვლიან $U_{გამ}$ -ის სიდიდის მნიშვნელობას. ღირებულებით „0 ←“ დააბრუნებენ ხელსაწყო ისარს საწყის მდგომარეობაში. გახსნიან სახედ-ფანჯარას და ფოლგირებული გეტინაქსის საცეცს გაატარებენ ელექტროდებს შორის რამოდენიმეჯერ. დახურავენ სახედ ფანჯარას. 5 წუთიანი დაყოვნების შემდეგ გაიმეორებენ ანალოგიურ ცდას. თუ ცდის ჩატარებისას გამზომი ხელსაწყო ისარმა გადააჭარბა $80 \div 85$ დანაყოფს, აპარატი გამორთულ უნდა იქნას ქსელიდან ღირებულებით „~“.

ზეთის ერთი სინჯისათვის ატარებენ 6 გარღვევის ცდას და აითვლიან შესაბამის $U_{გამ}$ -ის მნიშვნელობებს. გამოცდის დამთავრების შემდეგ გამზომ უჯრედს ამოიღებენ აპარატიდან, ზეთს გადაღვრიან, უჯრედს გამორეცხავენ და გაამშრალევენ.

გაზომვის შედეგების მიხედვით ახდენენ საშუალო არითმეტიკულის გაანგარიშებას:

$$U_{გამ(საშ)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{გამi} \quad (14)$$

სადაც $U_{გამi}$ - გამრღვევი ძაბვის მნიშვნელობაა თითოეული გარღვევისას. n - ჩატარებული გარღვევების რიცხვი.

გამრღვევი ძაბვის საშუალო არითმეტიკული მნიშვნელობის საშუალო კვადრატულ ცდომილებას σ_v - ადგენენ გამოსახულებით:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (U_1 - U)^2}{n(n-1)}} \quad (15)$$

ჩატარებული გამოცდების შედეგების უტყუარობა ფასდება ვარიაციის კოეფიციენტის V დადგენით:

$$v = \frac{\sigma_v \cdot 100}{U} \% \quad (16)$$

თუ ვარიაციის კოეფიციენტის მნიშვნელობა მეტია 20%-ზე ამ შემთხვევაში ატარებენ დამატებით ექვს გარღვევას იგივე სინჯის ახალი პორციისათვის. კვლავ დაადგენენ U_8 -ის სიდიდეს და σv ამ ფორმულაში გარღვევის რიცხვს აიღებენ $n = 12$ -ის ტოლს. ამ შემთხვევაშიც თუ V -ს მნიშვნელობამ გადააჭარბა 20%-ს, ჩაითვლება, რომ გამოსაკვლევი ზეთის ნიმუში ძლიერ არაერთგვაროვანია და ჩატარებული გაზომვებით არ შეიძლება სათანადო დასკვნების გაკეთება.

იმ შემთხვევაში, თუ ზეთის გამოცდის აპარატის AIM-90-ის მუშაობა უზრუნველყოფილია სტანდარტის მოთხოვნით, მაშინ გამრღვევი ძაბვის გაზომვის ცდომილების მნიშვნელობები არ აღემატება $\pm 2,5\%$ -ს.

1.8. მჟავური რიცხვის განსაზღვრა

მჟავური რიცხვი არის სატრანსფორმატორო ზეთის დამკველების ხარისხის განმსაზღვრელი კრიტერიუმი მისი ექსპლუატაციაში ყოფნის დროს. გარდა ამისა, მჟავური რიცხვის სიდიდის მიხედვით ხდება ადსორბენტის შეცვლა თერმოსიფონურ ფილტრებში და დგინდება რეგენერაციის ეფექტურობა. მჟავური რიცხვი განისაზღვრება ანალიზური მეთოდით [II].

მჟავური რიცხვი განისაზღვრება სატრანსფორმატორო ზეთში არსებული მჟავური ნაერთების გატიტვრით კალიუმის ჰიდროქსიდით. გატიტვრის დროს გამოიყენება KOH-ის სპირტიანი ხსნარი, ფერადი ინდიკატორი. მჟავური რიცხვი გამოისახება მგ KOH/გ ზეთში.

უშუალოდ სატრანსფორმატორო ზეთის მჟავური რიცხვის განსაზღვრამდე ხდება ხსნარების მომზადება. ხსნარების მოსამზადებლად

საჭიროა ახლადგადადენილი სპირტი, სპირტის გადადენა ხდება 1000 სმ³ კოლბაში დეფლაგმატორით. აზეოტროპიული ეთილის სპირტის დუღილის ტემპერატურა არის 78,2°C შემდეგ უნდა გადავაკრისტალოთ კალიუმის ბიფტალატი. 70გრ კალიუმის ბიფტალატი გავხსნათ 200 სმ³ დისტილირებულ წყალში, რომლის ტემპერატურაა 70-80°C. გახსნილი კალიუმის ბიფტალატიანი კოლბა მოვათავსოთ წყლიან აბაზანაში, რომლის ტემპერატურაა 30°C. გავაჩეროთ მორევის გარეშე კრისტალების გამოვარდნამდე. გამოყოფილი ბიფტალატის კრისტალები ფილტრაციის საშუალებით გამოვყოთ დედა ხსნარიდან და გავრეცხოთ მცირე რაოდენობის 30°C ტემპერატურის გამოხდილი წყლით. შემდეგ გავაშროთ ჰაერზე და დავახუროთ ფილტრის ქაღალდით. გადაკრისტალებული კალიუმის ბიფტალატი უნდა შევინახოთ ექსიკატორში. ყოველი ანალიზის დაწყების წინ 1 საათით უნდა გამოვაშროთ 105 ± 5°C.

100 გრ. ქარვის მჟავას ხსნიან დუღილის პროცესში 165 მლ. დისტილირებულ წყალში. ხსნარი გაიფილტრება ძაბრში. გაციების შემდეგ ხდება გამოკრისტალება, გაფილტვრა და ხელახლა გადაკრისტალება. კრისტალებს აშრობენ 105 ± 5°C მუდმივ წონამდე. გადაკრისტალებული ქარვის მჟავა შენახულ უნდა იქნეს ექსიკატორში დახურულ ბიუქსში. ყოველი ანალიზის დაწყების წინ, 1 საათით ადრე უნდა გამოვაშროთ 105 ± 5°C-ზე.

ფენოლფტალეინის ხსნარს ამზადებენ 1000 სმ³ ეთილის სპირტში I გრ ინდიკატორი ფენოლფტალეინის გახსნით მუდმივი მორევით.

KOH-ის ხსნარის მოსამზადებლად ჰგრ კრისტალურ KOH-ს ხსნიან 100 სმ³ ეთილის სპირტში. მიღებულ ხსნარს კარგად აურევენ და არა უმეტეს 24 სთ ბნელ ადგილზე. დაწმენდილი, გამჭვირვალე ხსნარი უნდა გადავიტანოთ, მოვაშროთ ნალექი და შევინახოთ მუქი ფერის ბოთლში. ბიურეტი დაცული უნდა იყოს ასკარიტით. შემდეგ უნდა დავადგინოთ KOH-ის ტიტრი.

100 სმ³ მოცულობის კონუსურ კოლბაში მოვათავსოთ 0,05-0,07 გრ გადაკრისტალებული კალიუმის ბიფტალატი ანქარვის მჟავა. გავხსნათ ახლადგადადენილ დისტილირებულ წყალში, დავუმატოთ 3-4 წვეთი ფენოლფტალეინი. გავტიტროთ 0,05N KOH-ის ხსნარით, განუწყვეტელი მოძრაობით ვარდისფერის მიღებამდე, რომელიც მდგრადი იქნება 30 წმ-ის განმავლობაში.

კალიუმის ჰიდროჟანგის ტიტრი ტოლია:

$$T = \frac{56,11m}{EV_1} 1000 \quad (17)$$

სადაც 56,11 KOH-ის ექვივალენტური მასა

E - ქარვის მჟავის წონა

V₁ - KOH-ის ხსნარის მოცულობა, რომელიც დაიხარჯა გატიტვრაზე. ტიტრის საშუალო მნიშვნელობად ჩაითვლება სამი პარალელურიდან საშუალო. ამჟამის მოცულობა ფრთხილად გადაგვაქვს 1 ლიტრიან მზომ კოლბაში, ვავსებთ გამოხდილი წყლით.

ინდიკატორ ტუტის ლურჯი 6 ბ-ს მოსამზადებლად 2 გრამ ინდიკატორს გავხსნით 100სმ³ აზეოტროპიულ ეთილის სპირტში, რომელიც შეიცავს 100სმ³ 0,1N მარილმჟავას. ხსნარი დავაყოვნოთ 24 საათი. ინდიკატორის ხსნარი ინახება მუქი ფერის შუშაში, სიბნელეში.

ანდა 0,8 გრ ინდიკატორი ტუტის ლურჯი 6 ბ გავხსნათ 1000 სმ³ 96%-იან ეთილის სპირტში. შემდგომ 1500სმ³ ბენზოლი ავურიოთ ინდიკატორის სრულ გახსნამდე.

0,5%-იანი ინდიკატორ ნიტროზინის ყვითელის მომზადება შემდეგნაირად ხდება: 0,5 გრ ნიტროზინის ყვითელს მუდმივი მორევეთგახსნიან დისტილირებულ წყალში.

კობალტის 10%-იანი ხსნარის მოსამზადებლად 10 გრ კობალტის ნიტრატს გახსნიან 90 სმ³ დისტილირებულ წყალში.

ზემოთჩამოთვლილი ხსნარების მომზადების შემდეგ იწყება ანალიზის ჩატარება. 20 გრ გამოსაკვლევ ზეთს მოვათავსებთ 250 გრამიანი თავდახურულ კონუსურ კოლბაში. მეორე კოლბაში ჩავასხამთ 60 სმ³

ტოლუოლს, 40 სმ³ ეთილის სპირტს და დავუმატებთ 2სმ³ ინდიკატორ ტუტის ლურჯ 6 ბ-ს. ამ კოლბას უნდა დავუმატოთ წვეთ-წვეთობის KOH 0,1 ნ-ის მანამ, სანამ მიღებული არ იქნება წითელი ფერი იდენტური 10%-იანი კობალტის ნიტრატისა. ფერის შენარჩუნება უნდა ხდებოდეს 15 წმ. ეს ხსნარი უნდა დაემატოს გამოსაკვლევი ზეთის ნიმუშს, ავურიოთ და გავტიტროთ $t = 25^{\circ}\text{C}$ -ზე არაუმეტეს ზემოთ აღნიშნული ფერის მიღებამდე.

გაზომვის შესრულება ნიტროზინის ყვითლით შემდეგნაირად წარმოებს:

კონუსურ კოლბაში, რომლის მოცულობაა 100 სმ³ ჩავასხათ 20 გრ გამოსაკვლევი ზეთი. მეორე კოლბაში მოვათავსებთ 50სმ³ ეთილის სპირტს და ვადუღებთ 5 წთ ნაძვისებურ დეფლაგმატორთან ერთად. სპირტის დუღილის შემდეგ დავამატებთ 8-10 წვეთ ინდიკატორ ნიტროზინის ყვითელს, ცხელ მდგომარეობაში, მუდმივი მორევით და გავანეიტრალებთ KOH 0,1-ის 0,05 ნ ხსნარით პირველივე ფერის შეცვლამდე ყვითელი მწვანით. განეიტრალებულ ცხელ ხსნარს გადავიტანთ ზეთიან კოლბაში, რომელშიც მოთავსებულია გამოსაკვლევი ზეთი. ვადუღებთ 5 წთ. შემდეგ ნარევს გავტიტრავთ KOH-ის 0,5 ნ ხსნარით ფერის პირველივე ცვლილებამდე, ყვითელიდან მწვანეში.

ინდიკატორ ტუტის ლურჯით გაზომვა შემდეგნაირად ტარდება:

20 გრ. გამოსაკვლევი ზეთს მოვათავსებთ 250 სმ³ მოცულობის კონუსურ კოლბაში, დავამატებთ 40სმ³ ტუტის ლურჯი 6 ბ-ს ხსნარს და ვურევთ ნიმუშის სრულ გახსნამდე. გამოსაკვლევი ზეთი ინდიკატორთან ერთად ნელი მორევით იტიტრება 0,05 ნ კალიუმის ჰიდროქსიდით. ფერის გადასვლა ხდება ცისფერიდან წითელში. პარალელურად ვატარებთ კონტროლს კონუსურ კოლბაში მოცულობით 250 სმ³, 40 სმ³ ტუტის ლურჯ 6 ბ-ს გავტიტრავთ მსუბუქი მორევით 0,05 ნ. KOH-ით ცისფერის გადასვლიდან წითელში.

მჟავური რიცხვის განსაზღვრისას ნიტროზინის ყვითლით გაზომვის შემდეგი გამოითვლება ფორმულით

$$მჟ. რ = \frac{VT}{P} (\text{მგ. KOH/გრ}) \quad (18)$$

სადაც V - არის 0,05 ნ. KOH-ის ხსნარი, რომელიც გამოიყენება გატიტრის დროს სმ³.

T - KOH-ის ხსნარის ტიტრი მგ/სმ³

P - ზეთის ნიმუშის წონა. გრ.

ხოლო ტუტის ლურჯით მჟავური რიცხვი განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$\text{მჟ. რ} = \frac{V_1 - V_2}{P} (\text{მგ. KOH/გრ}) \quad (19)$$

სადაც V_1 - სპირტიანი KOH-ის ხსნარის რაოდენობა, რომელიც დაიხარჯა გამოსაკვლევ ხსნარის გატიტრაზე.

V_2 - სპირტიანი KOH-ის სპირტიანი ხსნარის რაოდენობა, რომელიც დაიხარჯა საკონტროლო ცდაზე სმ³.

T - KOH-ის ტიტრი მგ/სმ³

P - ზეთის ნიმუშის მასა. გრ.

მჟავური რიცხვის მნიშვნელობად ითვლება ორი პარალელური ცდის შედეგების საშუალო არითმეტიკული.

1.9. სატრანსფორმატორო ზეთის სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდები

სატრანსფორმატორო ზეთის სიმკვრივე წარმოადგენს ერთ-ერთ საიდენტიფიკაციო პარამეტრს და ექსპლუატაციისათვის მისი გაზრდა ზეთის დამველების მაჩვენებელია.

სატრანსფორმატორო ზეთის სიმკვრივის განსაზღვრით ხდება გამოსაკვლევ ზეთის შესაბამისობის დადგენა მის მარკასთან. სიმკვრივე წარმოადგენს საიდენტიფიკაციო პარამეტრს და სხვადასხვა მარკის ზეთებისთვის სხვადასხვაა. იგი დამოკიდებულია გარეშე ფაქტორებზე, ამასთანავე მისი დადგენით შესაძლებელია სხვა მახასიათებელი სიდიდეების განსაზღვრა, რომელთა სიდიდის შედარება შესაბამის ნორმატიულ დოკუმენტებთან განსაზღვრავს ზეთის ხარისხს.

გამოსაკვლევი ზეთის სიმკვრივის გასაზომად გამოიყენება : ნავთობის არეომეტრები [3]გაზომვის ფარგლებით: $0,710 \pm 0,890$ გრ/სმ³ დაგრადუირებული ქვედა მენისკით; მინის ცილინდრები არეომეტრებისათვის [3]250სმ³ ან 500სმ³ მოცულობისა; მინის თერმომეტრები [4]TJI-4 №4; თერმოსტატი ან აბაზანა წყლის შენარჩუნებით, არაუმეტეს $\pm 0,2^{\circ}$. გამოსაცდელი ზეთის ნიმუში უნდა იყოს ერთგვაროვანი. იგი არ უნდა შეიცავდეს შეწონილ მსხვილ ნაწილაკებს და წყლის წვეთებს, გაზომვის წინ ზეთის ტემპერატურა უნდა იყოს სუფთა და მშრალი.

გაზომვის წინ ზეთის ტემპერატურა მიყვანილი უნდა იქნეს ოთახის ტემპერატურამდე. შემდეგ არეომეტრის ცილინდრს დადგამენ სწორ ზედაპირზე და ზეთის ნიმუშის პორციას ფრთხილად ჩაასხამენ, ისე რომ არ გაჩნდეს ჰაერის ბურთულები ზეთის ზედაპირზე. ბურთულების გაჩენის შემთხვევაში მას დაშლიან მინის წვირით ან ფილტრის ქაღალდით. გამოსაცდელი ზეთის ტემპერატურას ზომავენ სიმკვრივის განსაზღვრამდე და განსაზღვრის შემდეგაც. გაზომვისას ტემპერატურის შენარჩუნება უნდა ხდებოდეს $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ -ით. თუკი სიმკვრივეს ზომავენ თერმომეტრიანი არეომეტრით, მაშინ ტემპერატურის გაზომვა ხდება უშუალოდ არეომეტრის თერმომეტრით სიზუსტით $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

სუფთა და მშრალ არეომეტრს ხელს მოკიდებენ სკალის წვერზე და ძალიან ფრთხილად ჩაუშვებენ ზეთში ისე, რომ მისი ტივტივის შემდეგ ზეთით არ დაისვაროს სკალის მშრალი ნაწილი. არეომეტრი არ უნდა ეხებოდეს ცილინდრის კიდელს. არეომეტრის რხევის დამთავრების შემდეგ სითხის მენისკის ზედა საზღვრით აითვლება არეომეტრის სკალაზე სიმკვრივის მნიშვნელობა. იმ შემთხვევაში თუ ათვლა მოხდა ქვედა მენისკით , ანათვალში შეიტანენ შესწორებას $\pm 0,0007$ გ/სმ³. სიმკვრივის ათვლისას თვალთ დაკვირვება ხდება მენისკის დონის გასწვრივ. როცა გაზომვისას ტემპერატურა განსხვავებულია 20°C - გან ახდენენ სიმკვრივის გადაანგარიშებას 20°C -ზე:

$$\rho^{20} = \rho^1(1 + \alpha(t - 20)), \quad (20)$$

სადაც α სიმკვრივის ტემპერატურული კოეფიციენტი და ტრანსფორმატორის ზეთისათვის $\alpha = 0.00065 \frac{1}{C^{\circ}}$ გაზომვას ატარებენ ზეთის ერთი და იგივე ნიმუშის ორი პორციისათვის და განსაზღვრავენ სიმკვრივის საშუალო მნიშვნელობას. არეომეტრით სიმკვრივის $0,710 \div 0,890$ გრ/სმ³ ფარგლებში გაზომვისას დასაშვები ცდომილება შეადგენს $\pm 0,0003$ გ/სმ³.

ერთი ოპერატორის მიერ მიღებული ორი შედეგი ითვლება უტყუვრად (95% სარწმუნო ალბათობით), თუ მათ შორის განსხვავება არ აჭარბებს $0,005$ გ/სმ³ გამჭვირვალე ზეთებისათვის; $0,006$ გ/სმ³ მუქი, გაუმჭვირვალე ზეთებისათვის.

ორ სხვადასხვა ლაბორატორიაში მიღებული ორი გაზომვის შედეგი ითვლება უტყუვრად თუ მათ შორის განსხვავება არ აჭარბებს $0,0012$ გ/სმ³ გამჭვირვალე ზეთებისათვის, ხოლო $0,0015$ გ/სმ³ მუქი გაუმჭვირვალე ზეთებისათვის.

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

1.9.1. ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების განსაზღვრა

ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების (tgd) სიდიდე ზეთის საექსპლუატაციო მდგომარეობის ძირითადი მახასიათებელია.

ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთის tgd სიდიდის ზრდა ზეთის დაძველებაზე და მასში გარკვეული სახის მინარევების ან მყარი იზოლაციის დაძველების პროდუქტების არსებობაზე მიუთითებს. tgd - ს განსაზღვრა სტანდარტის მოთხოვნის მიხედვით ხორციელდება იმავე უჯრედსა (ნახ.3) და თერმოსტატში, რომლითაც განისაზღვრება ზეთის კუთრი წინაღობა [11].

უჯრედის მომზადებაც და ზეთით შევსებაც ასევე ანალოგიურია. (ნახ. 8)-ზე ნაჩვენებია tgd სიდიდის გაზომვა ცვლადი ძაბვის ბოგირით ($P5026$), რომელიც ხორციელდება ტემპერატურის დამყარებიდან 10 წუთის გავლის შემდეგ.

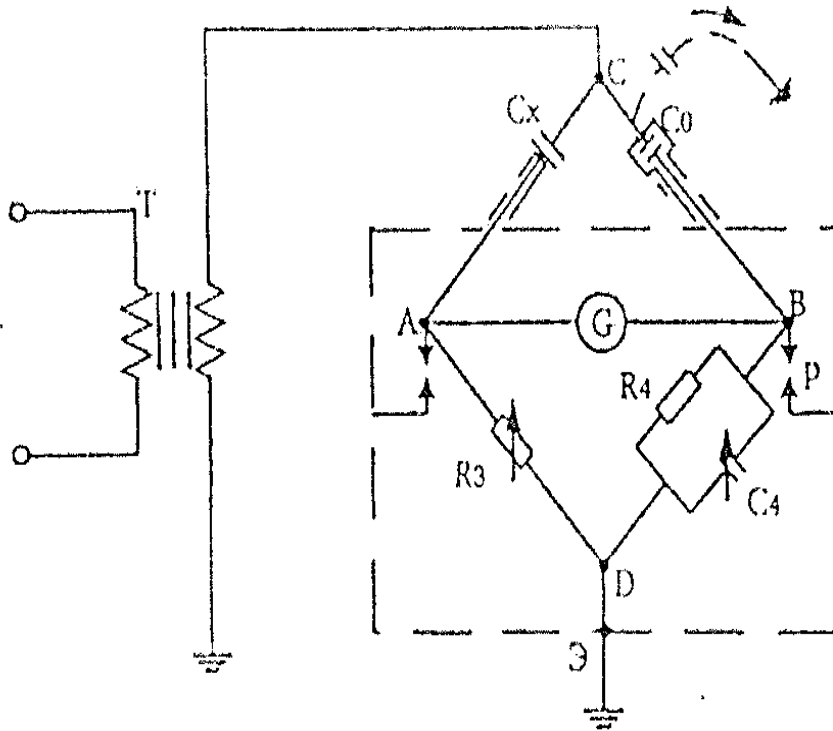
ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების (tgd) დადგენა ხორციელდება 50 ჰერცი ძაბვის მოქმედებით. უჯრედში ელექტრული ველის დამაბულობა უნდა იყოს 1კვ/მმ ტოლი, რადგანაც უჯრედის გამზომ და მაღალძაბვიან ელექტროდებს შორის მანძილი $2\pm 0,1$ მმ ტოლია, ამის გამო, tgd -ს გაზომვის სქემაზე მიწოდებული ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობა 2 კვ-ის ($\pm 3\%$) ტოლია [11].

შერინგის ბოგირის ოთხი მხარიდან (ნახ.8) ორი ტევადურ მხარს წარმოადგენს და გამოსაკვლევი C_x (ჩვენს შემთხვევაში გამზომი უჯრედი) და სანიმუშო C_0 ტევადობებისგან შედგება. აღნიშნული ტევადობები C წერტილში უკავშირდება ერთმანეთს, რომელზეც პირდაპირი სქემით გაზომვის შემთხვევაში მათალი ძაბვა მოქმედებს.

ბოგირის დანარჩენი ორი მხარი რეზისტორულ-ტევადურ მხარს წარმოადგენს. ერთი პარალელურად ჩართული მრავალსაფეხურიანი R_4 წინალობის და ცვლადი ტევადობის მქონე C_4 კონდენსატორისგან შედგება მეორე მხარეს მრავალსაფეხურიანი ცვლადი წინალობის მქონე რეზისტორი R_3 წარმოადგენს. ეს ორი მხარი ერთმანეთს ელექტრულად ბოგირის D წერტილში უკავშირდება.

სქემის D წერტილს ხელსაწყოს ეკრანის პოტენციალი აქვს და მიერთებულია დამიწებასთან.

შერინგის ბოგირის ტევადური და რეზისტორულ -ტევადური მხარების ელექტრულად დაკავშირება წონასწორობის A და B წერტილებში ხდება.



ნახაზი 8. ტრ-ის ზეთის დიელექტრიკული დანაკარგების და შეულწევადობის „შერინგის“ ბოგირით გაზომვის სქემა

იმ შემთხვევაში თუ დაზიანდება სქემის ნებისმიერი ელემენტი A და B წერტილები აღმოჩნდებიან მაღალი პოტენციალის ქვეშ. დანადგარის უსაფრთხოების თვალსაზრისით ამ წერტილებსა და ეკრანს შორის ჩართულია განმუხტველი მოწყობილობა.

ბოგირის წონასწორობის შემთხვევაში, სრულდება შემდეგი პირობა:

$$R_x \cdot C_x = R_4 \cdot C_4 \quad (21)$$

გამოსაკვლევი სისტემის დიელექტრიკული დანაკარგები $tg\delta$ -ს გამოთვლა ხორციელდება შემდეგი ფორმულის საშუალებით:

$$tg\delta = \frac{R_x}{X_{C_x}} = \omega \cdot R_x \cdot C_x \quad (22)$$

$$tg\delta = \omega \cdot R_4 \cdot C_4 \quad (23)$$

თუ R_4 სიდიდე მუდმივია, მაშინ გამოსაკვლევი საიზოლაციო სისტემის tgd სიდიდე C_4 სიდიდის დადგენით განისაზღვრება.

ტრანსფორმატორის ზეთის tgd განზომილება არ გააჩნია, ამიტომ ის გამოსახება პროცენტებში:

$$tgd\% = tgd \cdot 100\% \quad (24)$$

ბოგირის წონასწორობის შემთხვევაში გამოსაკვლევი საიზოლაციო სისტემის ტევადობა C_x , ბოგირის R_4 და R_3 წინაღობების სიდიდეს და C_0 ეტალონურ ტევადობას შემდეგი ფორმულით უკავშირდება:

$$\frac{C_x}{C_0} = \frac{R_4}{R_3}, \text{ ე.ი. } C_x = \frac{R_4}{R_3} C_0 \quad (25)$$

მიღებული შედეგების სიზუსტეს R_3 , R_4 და C_0 ბოგირის ძირითადი ელემენტების სიზუსტე, და ტემპერატურის სტაბილურობა განაპირობებს.

ელექტრომაგნიტური ველებისგან დაცვის მიზნით ხელსაწყოს ყველა ელემენტი და დამაკავშირებელი ელ გამტარები ელექტრული ეკრანით არის დაცული.

tgd სიდიდის მოწყობილობაზე ათვლა უჯრედებზე მაღალი ძაბვის მოქმედებიდან სამი წუთის შემდეგ 0,01% სიზუსტით წარმებს [11].

სათანადოდ მომზადებული ზეთით შეუვსებელი უჯრედი გაზომვის სქემას უკავშირდება და შესაბამისი ძაბვის მოქმედებით, ოთახის და გაზომვის ტემპერატურაზე tgd_0 და C_0 სიდიდეები იზომება. იმ შემთხვევაში როდესაც უჯრედის tgd_0 სიდიდე ტემპერატურის 15 – 35°C-ის ფარგლებში 0,01%-ს ზე მეტია, ეს იმას ნიშნავს, რომ უჯრედი ჭუჭყიანია და გაზომვის ჩატარება დიდ ცდომილებასთანაა დაკავშირებული.

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

1.9.2. ტრანსფორმატორის ზეთის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობის განსაზღვრა

ახალი ზეთებისათვის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა (ϵ_r) 20°C ტემპერატურაზე 2,15-დან 2,3-მდე იცვლება, ის მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ზეთის შემადგენლობაზე და სხვადასხვა მარკის ზეთებისათვის განსხვავებულია [22].

ტემპერატურის მომატებით ϵ_r სწორხაზოვნად მცირდება და ϵ_r ტემპერატურული კოეფიციენტის სიდიდე $\alpha_\epsilon = -0,0006 - 0,00067 \frac{1}{\text{გრად}}$,

ე.ი. ტემპერატურის 20°C-დან 90°C-მდე მატებით ტრანსფორმატორის ახალი ზეთის ϵ_r სიდიდე დაახლოებით 0,1 -ით მცირდება.

დაძველების პროდუქტები და სხვადასხვა სახის მინარევები ტრანსფორმატორის ზეთის ϵ_r სიდიდეს ზრდის. აქედან გამომდინარე ϵ_r - ის ცვლილების მეშვეობით შესაძლებელია საექსპლუატაციო ზეთის ხარისხის შეფასება.

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

$$D_v = \epsilon_r - (n)^2 \quad (26)$$

ვერმანის კოეფიციენტის სიდიდე ტემპერატურაზე დამოკიდებული არ არის, მაგრამ D_v განსაზღვრას და, შესაბამისად, ϵ_r და n -ის გაზომვას 20 – 25°C -ის ინტერვალში ახდენენ. ვერმანის კოეფიციენტი ტრანსფორმატორის ზეთის დაძველების დაწყებას ადრეულ ეტაპზე გამოავლენს და ევროპის ქვეყანებში ამ უკანასკნელის დადგენას დიდ ყურადღებას აქცევენ.

ტრანსფორმატორის ზეთის ϵ_r სიდიდის განსაზღვრა სტანდარტით სავალდებულო არ არის, ზეთში დაძველების პროცესების დაწყების დასადგენად მისი განსაზღვრა აუცილებელია.

ϵ_r სიდიდეს ზეთით შეუვსებელი უჯრედის ტევადობის C_0 და ტრანსფორმატორის ზეთით შევსებული უჯრედის ტევადობათა (C) ფარდობით გამოითვლება:

$$\varepsilon_r = \frac{C - C_{\text{კარ}}}{C_0 - C_{\text{კარ}}} \quad (27)$$

C და C_0 სიდიდეების დადგენა ცვლადი ძაბვის ბოგირის საშუალებით, $tg\delta$ - ს გაზომვასთან ერთად, იმავე პირობებში წარმოებს.

ტევადობის (C_0 და C) განსაზღვრა ორი ცდის საშუალებით წარმოებს, რომლის დროსაც უმცირესი, უდიდესი შედეგიდან - 5%-ზე მეტად არ უნდა განსხვავდებოდეს. ტრანსფორმატორის ზეთის სხვა პარამეტრებთან შედარებით ε_r -ის განსაზღვრა გაზომვის მეტ სიზუსტეს და უჯრედის იდეალურ სისუფთავეს მოითხოვს.

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

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

$$C_{\text{კარ}} = \frac{C_0 \varepsilon_r' - C'}{\varepsilon_r' - 1} \quad (28)$$

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

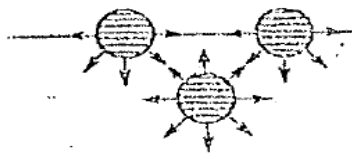
1.9.3. ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობის დადგენა

სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალებით არის განპირობებული. სითხის მოცულობაში აღნიშნული ძალები ერთმანეთს აკომპენსირებს, მაგრამ ზედაპირზე არსებულ მოლეკულაზე ზემოქმედებს გაუწონასწორებელი ძალა, რომელიც ზედაპირიდან მიმართულია მოცულობისაკენ (ნახ. 9ა), ამის გამო, მოცულობიდან ზედაპირზე მოლეკულის გადასადგილებლად გარკვეული

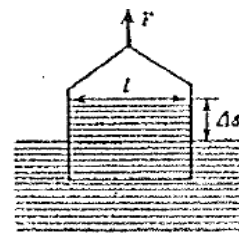
სამუშოს შესრულებაა საჭირო, რომელიც ამ ძალას გადალახავს. შედეგად, ზედაპირზე მყოფ მოლეკულას გარკვეული პოტენციალური ენერგია გააჩნია, რომელსაც ზედაპირულ ენერგიას უწოდებენ. თუ სითხეზე გარეშე ძალები არ მოქმედებს, ეს ენერგია მინიმალურია და სითხის მოლეკულათა ჯგუფს (წვეთს) ზედაპირის მინიმალური ფართი აქვს, ანუ სფეროს ფორმა აქვს.

ზედაპირული ენერგიის ფარდობას წვეთის ფართთან ზედაპირულ დაჭიმულობას უწოდებენ.

სხვადასხვა მინარევებისგან გაწმენდილ ზეთში მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალები დიდია. მინარევები ამ ძალებს ამცირებენ რაც ზედაპირულ დაჭიმულობას ამცირებს.



ა



ბ

ნახაზი 9. სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის (ა) და განსაზღვრის (ბ) სქემა

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

ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდის განსაზღვრა ხორციელდება სითხეში ჩაშვებული ცილინდრული ფორმის ჩარჩოს საშუალებით, რომელიც იმ ძალის დადგენას გულისხმობს, რაც საჭიროა ზედაპირიდან

სითხის წვეთის მოსაწყვეტად. (ნახ.9 ბ). პრაქტიკაში შედარებით უფრო მარტივი მეთოდიც გამოიყენება, რომელიც წინასწარ ცნობილი ზედაპირული დაჭიმულობის მქონე სითხის (გამოხდილი წყალი) წვეთების რაოდენობების ჰაერში და გამოსაკვლევ სითხეში ფარდობით განისაზღვრება.

ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდის დადგენა საწვეთურის საშუალებით ხორციელდება რაც შტატივს წარმოადგენს (ნახ. 2.8), რომლის მოსახსნელ მილისებურ სამაგრში ჩადგმულია 2სმ³ მოცულობის სამედიცინო დეგუში, 1 მმ შიგა დიამეტრის თავიანი ნემსით. დეგუში მექანიკურადაა დაკავშირებული მიკრომეტრულ ხრახნთან, რაც გამოხდილი წყლის სტაბილურად ჩამოწვეთებას უზრუნველყოფს. მილისებური სამაგრის ქვემოთ, თაროზე იდგმება 100სმ³ მოცულობის ჭიქა.

ცხრილი 3. გამოხდილი წყლის სიმკვრივე (ρ) და ზედაპირული დაჭიმულობა (σ) ტემპერატურების მიხედვით

t °C	σ 10 ⁻³ წ/მ	ρ გ/სმ ³	t °C	σ 10 ⁻³ წ/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	0,99797	35	70,255	0,99406

იმისათვის რომ განვსაზღვროთ ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა საჭიროა ვიცოდეთ მოცემულ ტემპერატურაზე გამოხდილი წყლის სიმკვრივე და მისი ზედაპირული დაჭიმულობა. გამოსაკვლევი ზეთის სიმკვრივე ცდით უნდა დადგინდეს, ხოლო გამოხდილი წყლის სიმკვრივის და ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდეები წინასწარ არის ცნობილი სტანდარტული ცხრილებიდან (ცხრ. 3).

დაითვლება ნემსიდან გამოდინებული გამოხდილი წყლის წვეთების რაოდენობა ჰაერში და იგივე მოცულობის წყლის წვეთების რაოდენობა გამოსაკვლევ ზეთში. მუდმივი ტემპერატურის პირობებში ნემსიდან ჰაერში გამოყოფილი წვეთების რაოდენობა უცვლელი. რაც შეეხება გამოსაცდელ ზეთში გამოყოფილ წყლის წვეთების რაოდენობას, დამოკიდებულია ზეთის დაძველების ხარისხზე და მით მეტია რაც უფრო დაძველებულია ზეთი. გაზომვის დაწყებამდე შტატივიდან იხსნება მილი და ქვედა ნაწილიდან დამჭერი ხრახნი და ფრთხილად ვიღებთ დგუმს ნემსთან ერთად.

გამოხდილი წყალი არ უნდა ეკვროდეს დგუმის კედლებს და თანაბრად უნდა ჩამოდიოდეს ქვემოთ. თუ ეს ასე არ ხდება, ან და კედელზე ფიქსირდება ნალექი, უნდა მოხდეს დგუმის გარეცხვა 5%-იანი ქრომის ხსნარით, ეთილის სპირტით და შემდგომ გამოხდილი წყლით. სუფთა დგუმში შეიყვანენ გამოხდილ წყალს 2სმ³ ნიშნულამდე, შემდეგ მიწოლით მოცულობას მიიყვანენ 1სმ³-მდე ისე, რომ დგუმიდან მაქსიმალურად გამოიდევენოს ჰაერის ჩანართი. ჩადგამენ დგუმს დამჭერ მილში, ხოლო ამ უკანასკნელს დააფიქსირებენ ხელსაწყოს შტატივზე.

შტატივის სადგარზე დადგამენ 100სმ³ მოცულობის ჭიქას და მიკრომეტრული ხრახნით მდორე მოძრაობით დაიწყებენ დგუმიდან გამოხდილი წყლის გამოდევნას, მის სრულ დაცლამდე. აითვლიან გამოსული წვეთების რაოდენობას ჰაერში - R_1 . გაზომვა ტარდება სამჯერ და იანგარიშება მისი საშუალო მნიშვნელობა. თუ განსხვავება წვეთების რაოდენობას შორის მეტია 1-ზე, ცდა თავიდან ტარდება. იგივე პრინციპით ითვლება წყლის წვეთების რაოდენობა ზეთშიც, და ანგარიშობენ R_2 -ის

საშუალო მნიშვნელობას. ცდის ჩატარებისას t ტემპერატურაზე დააფიქსირებენ გამოხდილი წყლის სიმკვრივეს, ზედაპირულ დაჭიმულობას და ზეთის სიმკვრივეს.

ცდით მიღებული და სიდიდეებით იანგარიშებენ ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობას

$$\sigma = \frac{R_1}{R_2} (\rho_1 - \rho_2) \sigma_1 \cdot 10^{-3} \text{ ნ/მ}^2, \quad (29)$$

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 - გამოხდილი წყლის ზედაპირული დაჭიმულობა t ტემპერატურაზე.

სტანდარტით დადგენილია ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობის განსაზღვრის ტემპერატურა რომელიც უნდა იყოს 25°C . ცდების განსხვავებულ ტემპერატურებზე ჩატარების დროს კი გამოიყენება ე.წ. შესწორების კოეფიციენტი $\Delta\sigma$:

$$\Delta\sigma = 0,1043 (t - 25) \quad (30)$$

ხოლო ტრანსფორმატორის ზეთის ზედაპირული დაჭიმულობა შემდეგი ფორმულით იანგარიშება:

$$\sigma = \frac{R_1}{R_2} (\rho_1 - \rho_2) \sigma_1 + 0,1043(t - 25) \quad (31)$$

1.9.4. ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხის მაჩვენებლის განსაზღვრა

სინათლის სხივის ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას დაცემის და გარდატეხის კუთხეების სინუსების ფარდობას მუცემულ გარემოში სინათლის სხივის გარდატეხის (ზოგჯერ რეფრაქციის) კოეფიციენტს (n) უწოდებენ. გარდატეხის მაჩვენებელი ზეთის სტრუქტურით არის განპირობებული და ტრანსფორმატორის ზეთის დამახასიათებელი 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 დგინდება, 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°C - ზე. თუ იუსტირება საკონტროლო ფირფიტით ხორციელდება, მაშინ ტემპერატურა $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ უნდა იყოს, ხოლო დისტილირებული წყლით იუსტირებისას აუცილებელია ტემპერატურის სიზუსტე $\pm 2^{\circ}\text{C}$ -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 გაუმზებენ $20 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურის წყალს. გახსნიან გამანათებელ პრიზმას. გამზომი პრიზმის ზედაპირზე დაიტანენ დისტილირებული წყლის 2-3 წვეთს, დაუმზებენ 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 $20 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ -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 $20 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$. 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.

იმ შემთხვევაში, როდესაც ცდა ჩატარდება 20°C- დან განსხვავებულ ტემპერატურაზე n_{20} საშუალო მნიშვნელობა მიიყვანება 20°C-ზე შემდეგი ფორმულის საშუალებით:

$$n_{20} = n_1 + \alpha (t - 20) \quad (32)$$

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

თავი 2

ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლებს შორის კავშირი

2.1. მინარევების გავლენა ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევ ძაბვაზე

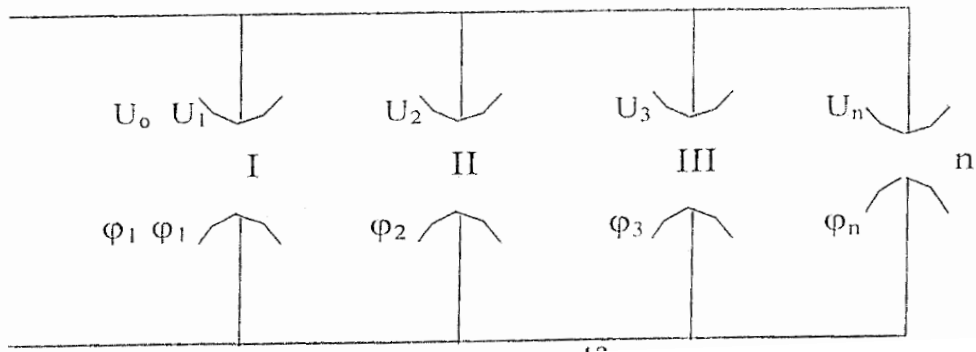
ტრანსფორმატორის ზეთის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს მისი გამრღვევი ძაბვის (U_გ) სიდიდე 50 ჰც სიხშირეზე სტანდარტულ ელექტროდებს შორის, როცა ელექტროდებს შორის მანძილი სტანდარტის [8] თანახმად 2,5 მმ-ის ტოლია.

ცნობილია, რომ თხევადი დიელექტრიკების გამრღვევი ძაბვის სიდიდე სხვადასხვა ფაქტორებზეა დამოკიდებული. კერძოდ: მინარევების კონცენტრაციასა და გვარობაზე, ძაბვის მოქმედების ხანგრძლივობაზე, იმპულსის ფორმაზე და სხვა [13]. სტანდარტის თანახმად ტრანსფორმატორის ზეთის U_გ -ის სიდიდის განსაზღვრის დროს ხანგრძლივობა 30 წმ-ს არ აღემატება, ამიტომ გარღვევის მექანიზმებიდან (ამ შემთხვევაში) შეიძლება გამოირიცხოს თბური გარღვევის და ელექტროქიმიური დაძველების მექანიზმები. ე.ი. ადგილი აქვს მხოლოდ ელექტრულ გარღვევას, რომლის დროსაც მუხტის მქონე ნაწილაკი აჩქარდება ელექტრულ ველში, შეიძენს რა ენერგიას, დაჯახების მომენტში იწვევს ე.წ. „სუსტი“ რგოლების გაწყვეტას, მათ იონიზაციას. ეს პროცესი დროის მცირე შუალედში სწრაფად მიმდინარეობს და საბოლოოდ ადგილი აქვს გარღვევას. „სუსტი“ რგოლები შეიძლება წარმოქმნან როგორც სხვადასხვა სახის მინარევებმა, ასევე ტრანსფორმატორის ზეთის მოლეკულებმა, რომელთა ატომებს შორის ბმა არასრულყოფილია. მაგრამ ასეთი მოლეკულების რიცხვი, უმეტეს შემთხვევაში, ძალიან მცირეა. თუკი თხევადი დიელექტრიკი არ შეიცავს მინარევებს და იდეალური სისუფთავით გამოირჩევა, მაშინ ზემოთ აღნიშნული აჩქარებული ნაწილაკი იწვევს ძირითადი მასალის „სუსტი“ რგოლების იონიზაციას, რომლის დროსაც უმეტეს შემთხვევაში წყდება C-H ან C-OH კავშირები, რომელთა

იონიზაციის ენერჯის გათვალისწინებით თითქმის იდეალური სისუფთავის, ყველა ორგანული წარმოშობის საიზოლაციო სითხეებს მოახლოებით ერთმანეთის ტოლი სიდიდის ელექტრული სიმტკიცე უნდა ჰქონდეს:

$$E_{\text{გამრ}} = (160 - 200) \text{ კვ/მმ} \quad (33)$$

ეს საკითხი გარკვეულ პერიოდში სადაო იყო, მაგრამ 60-იანი წლების დასაწყისში ნიდერლანდელმა მეცნიერმა კოკმა ექსპერიმენტალურად დაადასტურა და მიიღო იდეალური სისუფთავის ტრანსფორმატორის ზეთი, რომლის გამრღვევი ძაბვა 150კვ/მმ იყო. მაგრამ ასეთი დიელექტრიკის პრაქტიკული გამოყენება თითქმის შეუძლებელია, რადგან მისი მიღება ძვირადღირებულია და ექსპლუატაციის პირობებში სამიოდეთვის შემდეგ მისი ელექტრული სიმტკიცე 5-6ჯერ მცირდება სხვადასხვა ფაქტორების გავლენით.



ნახაზი 10. (გამრღვევი ძაბვების) პარალელური ჩართვის სქემა

ელექტრული სიმტკიცის სიდიდეს, რომელიც იდეალური სისუფთავის თხევად დიელექტრიკებს გააჩნიათ მათ „შინაგან“ ელექტრულ სიმტკიცეს უწოდებენ და U_0 -ით აღნიშნავენ [14]. იგი პრაქტიკაში ძნელად მისაღწევია და მას მხოლოდ თეორიული მნიშვნელობა აქვს. რეალური თხევადი დიელექტრიკების ელექტრული სიმტკიცე გაცილებით ნაკლებია, რადგან მასზე დიდ გავლენას ახდენს მინარევები, რომლებიც შეიძლება იყვნენ თხევად, აირად ან მყარ მდგომარეობაში. აგრეთვე მნიშვნელოვანია ამ

მინარევების ელექტრული თვისებების გათვალისწინება, კერძოდ: დიელექტრიკები არიან ისინი, თუ სხვა მასალები [13]. მინარევები სხვადასხვაგვარად ახდენენ გავლენას ელექტრულ სიმტკიცეზე და გარღვევის მომენტში მეტად გამოვლინდება ის მინარევები, რომლებიც ძლიერ გავლენას ახდენენ ელექტრულ სიმტკიცეზე. ამიტომ ჩვენ შეგვიძლია, მათ გამრღვევი ძაბვები სქემატურად პარალელურად ჩავრთოთ (ნახ.10).

გარღვევის შესაბამისი ალბათობით, თანაც რაც მეტია მოცემული ფაქტორით განპირობებული გამრღვევი ძაბვის სიდიდე U_n მით ნაკლებად ალბათურია ψ_n მისი გავლენა გამრღვევი ძაბვის მიღებულ შედეგზე ანუ

$$U_0 > U_1 > U_2 > \dots > U_n \quad (34)$$

$$\psi_0 < \psi_1 < \psi_2 < \dots < \psi_n$$

ამასთანავე ალბათური განაწილების ნებისმიერ მრუდზე გარღვევის მცირე ალბათობით გამრღვევი ძაბვის მინიმალური მნიშვნელობა შეესაბამება, რომელიც გამოწვეულია ყველაზე აქტიური მინარევებით ($\varphi_n U_n$). თუ ეს ფაქტორი არ არსებობს, მაშინ ის მინარევები იჩენენ თავს, რომელთა მიერ განპირობებული $U_{გამრ} > U_n$ და შესაბამისად მისი ალბათობაც $\psi > \varphi_n$. პრაქტიკაში სავარაუდოა, რომ არსებობდეს ისეთი ორი ან რამოდენიმე სახის მინარევი, რომლებიც თანაბარ გავლენას ახდენენ U_g -ზე. ამ დროს გამრღვევი ძაბვის ცვლილებას დიდი დიაპაზონი გააჩნია და შესაბამისად ვარიაციის კოეფიციენტიც მაღალია, რაც დიელექტრიკის არაერთგვაროვნებაზე მიუთითებს. ასევე დიდ დიაპაზონში შეიცვლება გარღვევის ალბათობაც [5]. ხოლო როცა მინარევების გავლენა მცირეა თხევადი დიელექტრიკის სიმტკიცეზე და მინარევები ერთგვაროვანი და ერთი სახისაა, მაშინ U_g შედარებით დიდია და გარღვევის ალბათობაც მცირე დიაპაზონში იცვლება (ნახ.10).

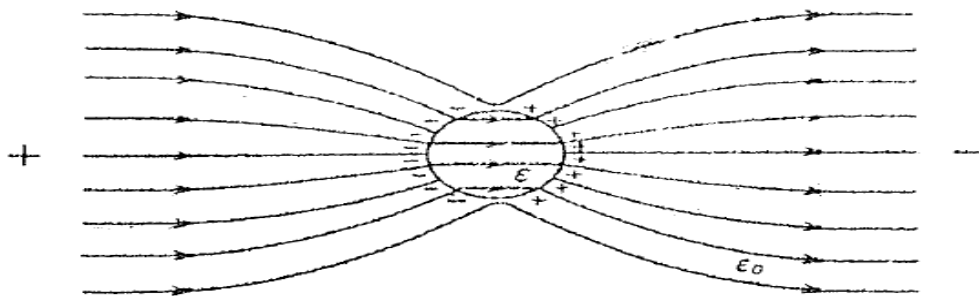
დიელექტრიკის გამრღვევ ძაბვაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მინარევთა გვარობა, კერძოდ: მინარევების დიელექტრიკული შეღწევადობა. როცა მინარევების დიელექტრიკული შეღწევადობა ϵ_g მეტია საიზოლაციო

სითხის დიელექტრიკულ შეღწევადობაზე $\epsilon_{\text{თ}}$, მაშინ მინარევები პოლირიზდებიან. ისინი ხდებიან ინდუცირებული დიპოლები μ დიპოლური მომენტით, რომელიც დაძაბულობის პროპორციულია. სხვადასხვა დიელექტრიკული შეღწევადობის მქონე სხვადასხვა ნაწილაკი-მინარევი, ველის ძალწირების კონცენტრირებას სხვადასხვა ფორმით იწვევს (ნახ.11) მის სიახლოვეს.

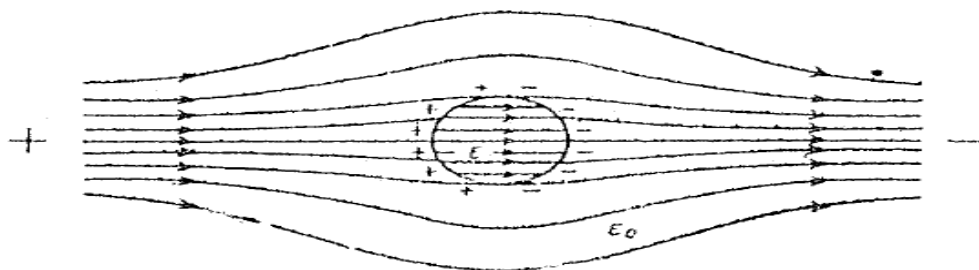
მინარევები, რომელთა $\epsilon_{\text{გ}}$ მეტია ტრანსფორმატორის ზეთის დიელექტრიკულ შეღწევადობაზე, უფრო ძლიერ გავლენას ახდენენ ელექტრული ველის ერთგვაროვნებაზე, ვიდრე სხვა სახის მინარევები. კერძოდ: წყლის მცირე ზომის ნაწილაკები უფრო მეტი ელექტრული ველის დაძაბულობის ქვეშ იმყოფებიან, ვიდრე ამავე ზომის ტრანსფორმატორის ზეთის ნაწილაკები:

$$\epsilon_{\text{გ}} > \epsilon_{\text{თ}}$$

$$\epsilon_{\text{გ}} > \epsilon_{\text{თ}}$$



$$\epsilon_{\text{გ}} > \epsilon_{\text{თ}}$$



$$\epsilon_{\text{გ}} < \epsilon_{\text{თ}}$$

ნახაზი 11. ელექტრული ველის ძალწირების განაწილება

$$\frac{E_{H2o}}{E_{ზეთის}} = \frac{\varepsilon_{H2o}}{\varepsilon_{ზეთის}} = \frac{81}{2,5} \approx 32 \quad (35)$$

ე. ი. თუ ტრანსფორმატორის ზეთი შეიცავს წყლის ნაწილაკებს, მაშინ მათზე 32-ჯერ მეტი ველის დაძაბულობა მოდის, ვიდრე თვითონ ზეთის ნაწილაკებზე. ამასთან ელექტრული ველის მოქმედებით ისინი ველს ძალწირების გასწვრივ განლაგდებიან და უფრო ადვილად მოძრაობენ, ვიდრე სხვა მუხტის მქონე ნაწილაკები. მიუხედავად იმისა, რომ წყლის მოლეკულების იონიზაციის ენერგია შედარებით ნაკლებია ზეთის მოლეკულების იონიზაციის ენერგიაზე, ისინი ზემოთ აღნიშნული ფაქტორის საშუალებით მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ ტრანსფორმატორის ზეთი გამრღვე ძაბვაზე.

ჩვენს მიზანს წარმოადგენს, ზემოთთქმულის საფუძველზე, ანალიზი გავუკეთოთ ექსპლუატაციაში მყოფი სატრანსფორმატორო ზეთის $U_g/2,5$ მმ სიდიდეზე ძირითადი მინარევების ტენშემცველობის და მექანიკური მინარევების რაოდენობას. ამ მიზნით ლაბორატორიაში მიღებული ცდების შედეგები დამუშავებულ იქნა და თვისობრივი ანალიზი ჩატარდა ვეიბულის განაწილების გამოყენებით, რაც უკანასკნელ წლებში ფართოდ გამოიყენება ელექტრული სიმტკიცის განსაზღვრის დროს. ამ მიზნით 44 ცდის შედეგით U_g -ის მნიშვნელობა მოცემული საექსპლუატაციო ზეთებისათვის დამუშავებულ იქნა სტატისტიკურად : $U_1 > U_2 > U_3 > \dots U_n$. განისაზღვრა შესაბამისი გამრღვევი ძაბვების ალბათობები $\varphi_n = \frac{n}{N} \cdot 100\%$ (ცხრ. 4) და აგებულ იქნა ამ განაწილების მრუდი ვეიბულის კოორდინატთა სისტემაში, (ნახ. 12). მიღებულ გრაფიკზე ნათლად ჩანს სამი უბანი: I, II, III.

თუ დიელექტრიკი ერთგვაროვანია და მას არ გააჩნია სხვადასხვა სახის მინარევები, მაშინ განაწილების მრუდი ვეიბულის კოორდინატთა სისტემაში ვერტიკალური ხაზია, მაგრამ თუ მინარევები არსებობს, მაშინ ზემოთთქმულის თანახმად მრუდს გააჩნია სხვადასხვა უბნები, რაც გამრღვევი ძაბვის სიდიდეზე სხვადასხვა ფაქტორების ზემოქმედებითაა გამოწვეული. კერძოდ I უბანს შეესაბამება გარღვევის მცირე ალბათობა და

გამრღვევი ძაბვის მცირე სიდიდე $U_{\delta(2,5\delta\delta)} < 30_{კვ}$. თუ ამ წერტილთა მახასიათებელ ცხრილს (ცხრ.4) ვნახავთ, ეს ის ნიმუშებია, რომელთაც უმეტესწილად მაღალი ტენზომცველობა აქვთ და მისი სიდიდე საექსპლუატაციო ნორმებს აღემატება (20გრ/ტ). მათში დიდია მექანიკური მინარევების რაოდენობაც, რაც ასევე არ აკმაყოფილებს საექსპლუატაციო ზეთების მოთხოვნებს.

ცხრილი 4. ტრანსფორმატორის ზეთის პარამეტრებს შორის კავშირი

<i>N^o</i>	<i>გამრღვევი ძაბვა U_{კვ/2,5მმ}</i>	<i>ტენზომცველობა W გრ/ტ</i>	<i>მექანიკური მინარევების კლასი</i>
1	12	57	XI
2	13	46	XIII
3	14	31	XIII
4	15	35	X
5	16	36	XIII
6	18	23	X
7	19	30	XI
8	19	30	X
9	20	31	XII
10	20	28	XI
11	23	43	XIII
12	25	32	XII
13	27	36	XIII
14	27	28	XIII
15	33	18	XI
16	34	29	XII
17	36	28	IX
18	37	15	XIII
19	41	34	XI
20	45	23	X
21	47	22	XI
22	47	20	IX
23	47	25	XI

24	48	23	X
25	52	22	XII
26	53	18	IX
27	53	24	IX
28	55	8	XI
29	58	18	XII
30	60	20	IX
31	61	33	X
32	62	15	XII
33	62	16	XII
34	64	27	IX
35	66	19	X
36	67	21	IX
37	67	7	IX
38	67	5	IX
39	68	15	IX
40	68	9	IX
41	68	10	IX
42	70	10	X
43	71	11	IX
44	72	9	IX

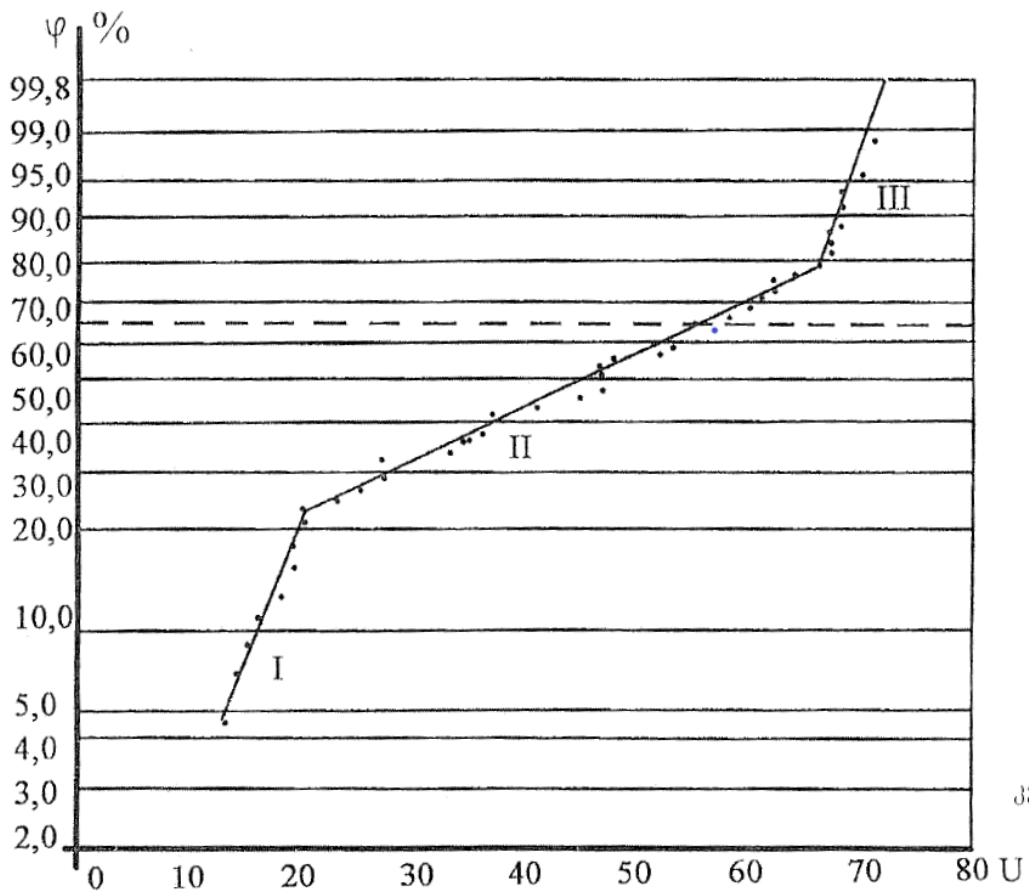
II უბანი, რომელიც მოთავსებულია I და III უბნებს შორის გაშლის დიდი დიაპაზონით ხასიათდება, სავარაუდოდ იგი განპირობებულია როგორც ტენზონცველობით, ასევე მექანიკური მინარევებით.

III უბანს, რომელიც მცირე ვარიაციის კოეფიციენტით ხასიათდება და გარღვევის მაღალ ალბათობებს შეესაბამება ახასიათებს დაბალი ტენზონცველობა და მექანიკური მინარევების მცირე რიცხვი, და როგორც წესი ამ ზეთების სხვადასხვა პარამეტრებიც საექსპლუატაციო ზეთის პირობებს აკმაყოფილებენ.

ცხრილი 5. ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევ ძაბვასა და ვარიაციის კოეფიციენტის დამოკიდებულება

<i>N</i> ^o	<i>U</i> _{გამრ} კვ/2,5მმ	<i>φ</i> %
1	12	2,3
2	13	4,5
3	14	6,8
4	15	9,1
5	16	11,4
6	18	13,6
7	19	15,9
8	19	18,2
9	20	20,5
10	20	22,7
11	23	25
12	25	27
13	27	29,5
14	27	31,8
15	33	34,1
16	34	36,4
17	36	38,6
18	37	40,9
19	41	43,2
20	45	45,5
21	47	47,7
22	47	20
23	47	52,3
24	48	54,5
25	52	56,7
26	53	59,1
27	53	61,4
28	55	63,6
29	58	65,9
30	60	68,2
31	61	70,5

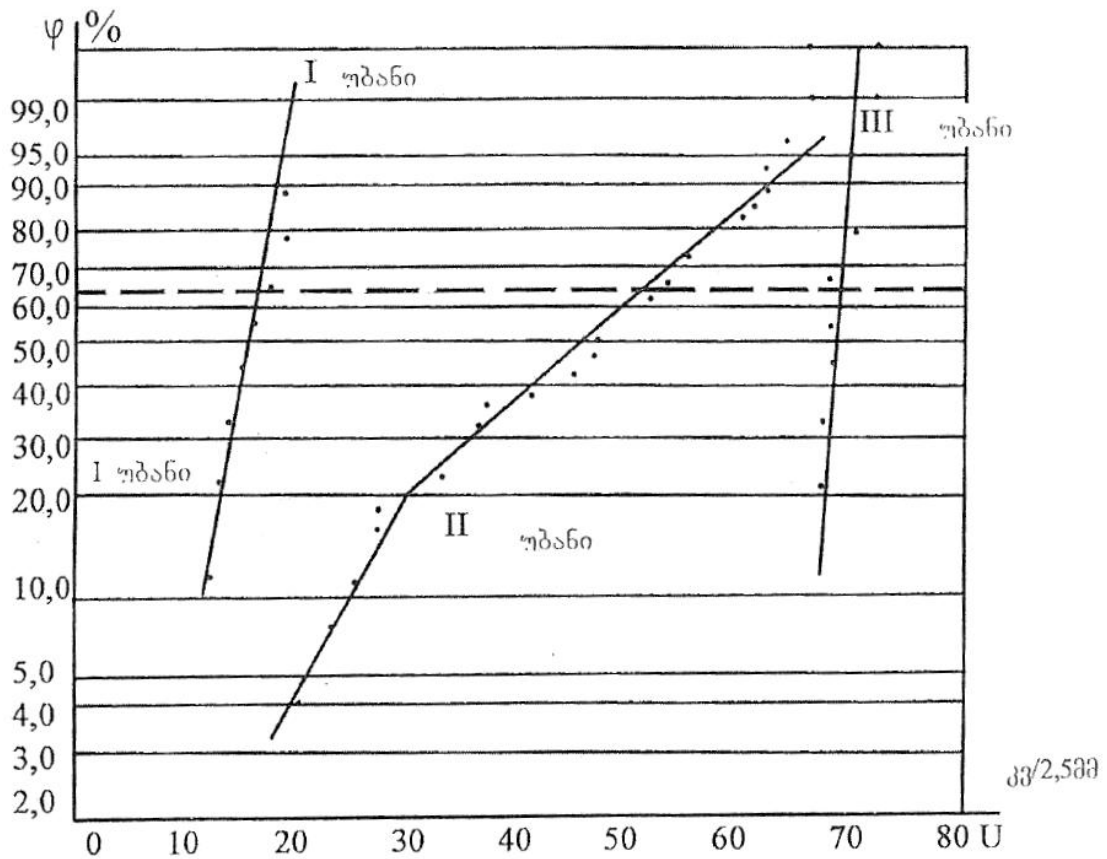
32	62	72,7
33	62	75
34	64	77,3
35	66	79,5
36	67	81,8
37	67	84,1
38	67	86,4
39	68	88,6
40	68	90,9
41	68	93,2
42	70	95,5
43	71	97,7
44	72	100



ნახაზი 12. ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევ ძაბვასა და ვარიაციის კოეფიციენტის დამოკიდებულების გრაფიკი

ცხრილი 6. ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევ ძაბვასა და ვარიაციის კოეფიციენტის დამოკიდებულება უბნების მიხედვით

I უბანი			II უბანი			III უბანი		
№	U_{β} კვ/2,5მმ	φ %	№	U_{β} კვ/2,5მმ	φ %	№	U_{β} კვ/2,5მმ	φ %
1	12	11	1	20	4	1	67	11
2	13	22	2	23	8	2	67	22
3	14	33	3	25	12	3	67	33
4	15	44	4	27	15	4	68	44
5	16	55	5	27	19	5	68	55
6	17	66	6	33	23	6	68	66
7	18	77	7	34	30	7	70	77
8	19	88	8	36	31	8	71	88
9	20	10	9	37	35	9	72	100
			10	41	38			
			11	45	42			
			12	47	46			
			13	47	50			
			14	47	54			
			15	48	58			
			16	52	62			
			17	53	65			
			18	53	69			
			19	55	73			
			20	58	80			
			21	60	81			
			22	61	85			
			23	62	88			
			24	62	92			
			25	64	96			
			26	66	100			



ნახაზი 13. გამრღვევი ძაბვის ალბათური განაწილება ცალკეული უბნების მიხედვით

კოორდინატთა სისტემაში აგებულ იქნა I, II, და III უბნის შესაბამის წერტილთა გამრღვევი ძაბვის ალბათური განაწილება ცალ-ცალკე (ცხრ.6) (ნახ.13). საიდანაც ჩანს, რომ III უბნის დახრის კუთხე თითქმის 90°-ს უახლოვდება, ე.ი. მცირე ვარიაციის კოეფიციენტი გააჩნია და ერთგვაროვანია. ამასთანავე გაშლის დიაპაზონი მცირე აქვს და გამრღვევი ძაბვა იცვლება მცირე ფარგლებში $67 \div 72$ კვ-მდე.

ყველაფერი ეს მიუთითებს, რომ ფაქტორი, რომელიც გამრღვევ ძაბვას განაპირობებს ერთი წარმომავლობისაა და სავარაუდოდ ეს უნდა იყოს მცირე ზომის მექანიკური მინარევები.

პირველი უბანი შედარებით ნაკლები დახრის კუთხით ხასიათდება. აქაც გამრღვევ ძაბვაზე მოქმედი ფაქტორი ერთი ბუნებისაა, სავარაუდოდ

მაღალი ტენშემცველობა, მაგრამ განიცდის სხვა ფაქტორების მცირე ზეგავლენასაც.

მეორე უბანს გააჩნია გადაღუნვის წერტილები, თითქმის გრაფიკის შუაში, რაც მიუთითებს, რომ ამ უბანზე თანაბრად მოქმედებს როგორც ტენიანობა, ასევე მექანიკური მინარევებიც. ტენიანობის შემცირებით უფრო გამოკვეთილად ჩანს მექანიკური მინარევების გავლენა.

საბოლოოდ შეგვიძლია ვთქვათ, რომ [თუ ტრანსფორმატორის ზეთი ხასიათდება მაღალი ტენშემცველობით და მექანიკური მინარევების დიდი რაოდენობით, მაშინ მისი გამრღვევი ძაბვის სიდიდე აუცილებლად მცირე იქნება და იგი შეესაბამება I უბანს (ნახ.12). ხოლო თუ ზეთი ხასიათდება მცირე ტენშემცველობით და მექანიკური მინარევების მცირე რაოდენობით, მაშინ სავარაუდოა, რომ დიდი ალბათობით მისი გამრღვევი ძაბვის სიდიდე მაღალი იყოს და შეესაბამებოდეს III უბანს. ხოლო მათ შორის შეიძლება იყოს შუალედური მდგომარეობა II უბანი. ლაბორატორიაში ცდების ჩატარებისას ეს მოსაზრება აუცილებლად გასათვალისწინებელია.]

2.2. ტრანსფორმატორის საექსპლუატაციო ზეთის v/p და $t_{გდ}$ -ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ტრანსფორმატორის ზეთის v/p და $t_{გდ}$ -ს დამოკიდებულების შესწავლის მიზნით $20 \div 90^{\circ}C$ ტემპერატურის ინტერვალში ჩვენს მიერ გამოყენებული იყო ქვესადგურ „ნავთლული - 220“-ის ტ-3 ტრანსფორმატორიდან აღებული ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთი და T-1500 მარკის ახალი ზეთი, რომელიც თავისი $t_{გდ}$ - სიდიდით არ აკმაყოფილებდა GOCT [9] მოთხოვნებს. ამ ზეთების მახასიათებლები მოყვანილია ცხრილ N7 და N8. როგორც ცხრილი N7-დან ჩანს „ნავთლული - 220“ T-3 სატრანსფორმატორო ზეთის ტენშემცველობა და მექანიკური მინარევების კლასი ნორმას აღემატება, ამის გამო ნორმაზე ნაკლებია გამრღვევი ძაბვის სიდიდე და ზეთი არ

აკმაყოფილებს საექსპლუატაციო ზეთის მოთხოვნებს, ხოლო ახალი BF - მარკის ზეთის tგნ-ს მნიშვნელობა 90 °C-ზე აღემატება ნორმას. შესაბამისად ასეთი ზეთის სპეციალური დამუშავების გარეშე ექსპლუატაციაში გამოყენება არარეკომენდირებულია.

ცხრილი 7. „ნავთლული-220“ ტ-3 ტრანსფორმატორის ავზის ზეთის საწყისი მახასიათებლები

N	მაჩვენებელთა დახასიათება	სტანდარტი	განზ. ერთეული	t°C	ნორმა	შედეგი
1	სიმკვრივე	ГОСТ3900-85	კგ/მ ³	20	<885	810
2	რეფრაქციის კოეფიციენტი	ГОСТ18895-2-73	-	20	<1.5	1.481
3	ფეთქის ტემპერატურა	ГОСТ6336-75	°C	-	>125	138
4	მჟავური რიცხვი	ГОСТ5985-79	მგ.KOH გ. ზეთზე	-	<0.1	0.065
5	წყალში ხსნადი მჟავები და ტუტეები	ГОСТ6307-75	მგ.KOH გ. ზეთზე	-	<0.014	ნეიტრალური
6	ტენშემცველობა	РД34.43.107-95	გრ/ტ	20	30	40
7	კინემატიკური სიბლანტე	ГОСТ33-82	ს.ს.ტ	20	≤28	17
				50	≤8	5.5
8	მექანიკური მინარევების კლასი	IEC-970	კლასი		<11	XIII
			Σ			816810
			1.2÷5 მკმ			306850
			5÷15 მკმ			403450
			15÷25 მკმ			86895
			25÷50 მკმ			8400
			50÷100 მკმ			1210
			100÷200 მკმ			6
200÷500 მკმ			0			
9	იონოლის შემცველობა	РД34.43.105-89	%		0.1	0.15
10	დიელექტრიკული	ГОСТ6581-75	%	20		15

	დანაკარგები			90	<12	42
11	კუთრი წინაღობა	ГОСТ6581-75		20		2.7x10 ⁷
				90	>10 ¹²	19x10 ⁸
12	დიელექტრიკული შეღწევადობა	ГОСТ6581-75		20	<2.3	2.5
13	ვერმანის კოეფიციენტი				0.01	0.09
14	გამრღვევი ძაბვა		კვ/2.5 მმ		40	28
15	საშ. კვადრატული გადახრა	ГОСТ6581-75	%		≤10	15
16	ვარიაციის კოეფიციენტი		%		≤20	18

ცხრილ N9 მოყვანილია „ნავთლული - 220“ - ზეთის $v, p, v/p$ - მნიშვნელობები სხვადასხვა ტემპერატურაზე, რომლის მონაცემებითაც ავაგეთ v/p დამოკიდებულების გრაფიკი (ნახ N14) ტემპერატურაზე, საიდანაც ჩანს, რომ საწყის ეტაპზე 40 °C-მდე ტემპერატურის გაზრდით v/p უმნიშვნელოდ იზრდება. აღწევს მაქსიმუმს, შემდეგ მცირდება და ბოლოს ისევ იზრდება. აღნიშნული ცვლილება სავარაუდოდ განპირობებულია $t = 50$ °C-ის ინტერვალში ბმული წყლის გახსნილ წყალში გადასვლით, რაც მკვეთრად ამცირებს კუთრ წინააღმდეგობას, ხოლო $t = 90$ °C-ის მახლობლობაში ადგილი აქვს თავისუფალი წყლის აორთქლების დაწყებას, რის გამოც წინააღმდეგობა უმნიშვნელოდ იზრდება, ხოლო v -ს დამოკიდებულება t -ზე, რომელიც მოყვანილია ნახაზ N9-ში თითქმის ექსპონენციალურ სახეს ატარებს, რაც იმას ნიშნავს, რომ აღნიშნული მექანიზმი, რომელიც გავლენას ახდენს p -ს ტემპერატურაზე, დამოკიდებულებაზე გავლენას ვერ ახდენს v -ს დამოკიდებულებას ტემპერატურასთან.

1. მიუხედავად იმისა, რომ ნორმას აკმაყოფილებს მექანიკურ მინარევებში შეიჩნევა დიდი ზომის ნაწილაკების, კერძოდ: 50-200 მკმ-მდე

2. არ აკმაყოფილებს ნორმის მოთხოვნებს

3. სპეციალური დამუშავების შემდეგ თანახმად ГОСТ 6581-75

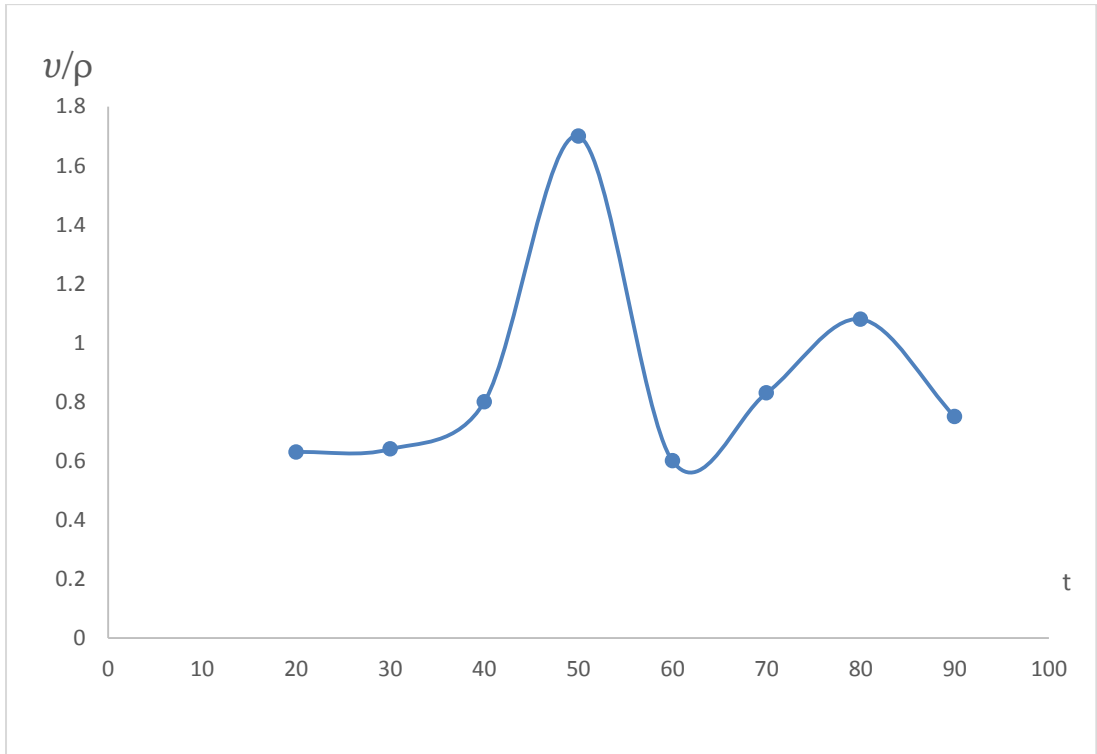
ცხრილი 8. T-1500 მარკის ახალი ზეთი

N	მაჩვენებელთა დახასიათება	სტანდარტი	განზ. ერთეული	t°C	ნორმა	შედეგი
1	სიმკვრივე	ГОСТ3900-85	კგ/მ ³	20	<885	805
2	რეფრაქციის კოეფიციენტი	ГОСТ18895-2-73	-	20	<1.5	1.4855
3	ფეთქის ტემპერატურა	ГОСТ6336-75	°C	-	>125	137
4	მჟავური რიცხვი	ГОСТ5985-79	მგ.KOH გ. ზეთზე	-	<0.1	0.0024
5	წყალში ხსნადი მჟავები და ტუტეები	ГОСТ6307-75	მგ.KOH გ. ზეთზე	-	<0.014	ნეიტრალური
6	ტენზომცველობა	РД34.43.107-95	გრ/ტ	20	30	35
7	კინემატიკური სიბლანტე	ГОСТ33-82	ს.სტ	20	≤28	18.3
				50	≤8	6.3
8	მექანიკური მინარევების კლასი	IEC-970	კლასი		<11	XI
			Σ			483825
			1.2÷5 მკმ			417940
			5÷15 მკმ			62945
			15÷25 მკმ			2414
			25÷50 მკმ			439
			50÷100 მკმ			47
			100÷200 მკმ			1
			200÷500 მკმ			0
9	იონოლის შემცველობა	РД34.43.105-	%		0.1	0.4

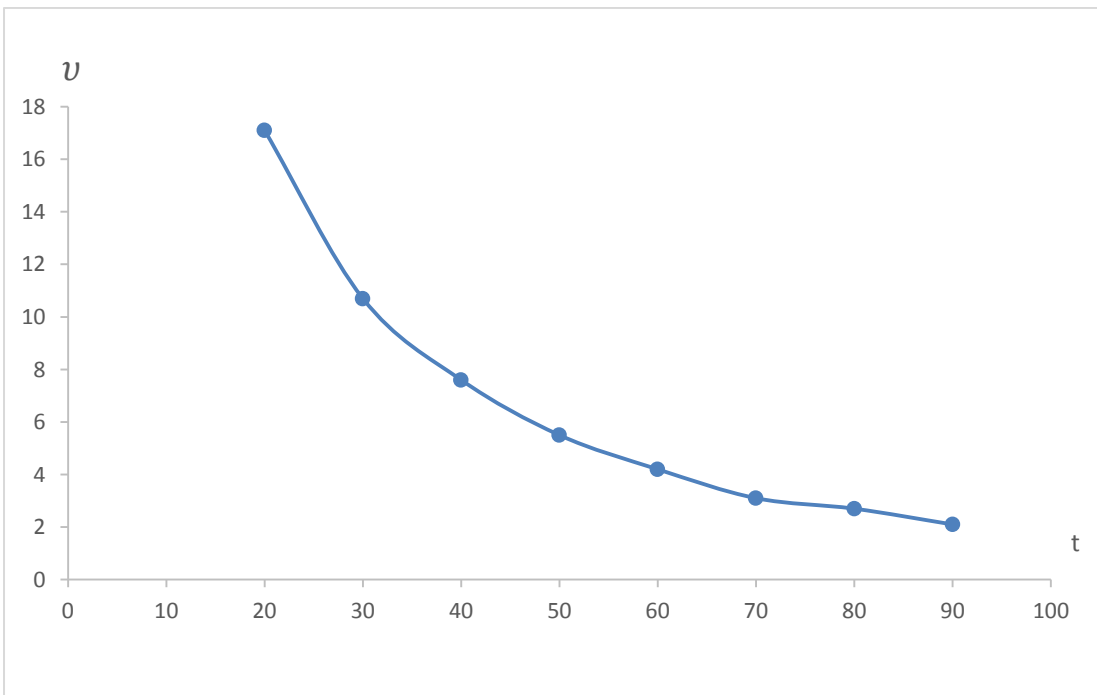
		89				
10	დიელექტრიკული დანაკარგები	ГОСТ6581-75	%	20		0.01
				90	<12	0.6
11	კუთრი წინაღობა	ГОСТ6581-75		20		1.2×10^{11}
				90	$>10^{12}$	0.5×10^{11}
12	დიელექტრიკული შელწევადობა	ГОСТ6581-75		20	<2.3	2.18
13	ვერმანის კოეფიციენტი				0.01	-
14	გამრღვევი ძაბვა	ГОСТ6581-75	კვ/2.5 მმ		40	45
15	საშ. კვადრატული გადახრა		%		≤ 10	-
16	ვარიაციის კოეფიციენტი		%		≤ 20	-

**ცხრილი 9. ქ. ს „ნავთლული -220“ T-3 ტრანსფორმატორის ზეთის ν , ρ და ν/ρ
დამოკიდებულება ტემპერატურაზე**

	$t/20$	ρ ომი.მ	ν ს.სტ	ν/ρ
1	20	27.1×10^9	17.1	0.63×10^9
2	30	16.7×10^9	10.7	0.64×10^9
3	40	9.5×10^9	7.6	0.8×10^9
4	50	3.2×10^9	5.5	1.7×10^9
5	60	7×10^9	4.2	0.6×10^9
6	70	3.7×10^9	3.1	0.83×10^9
7	80	2.5×10^9	2.7	1.08×10^9
8	90	2.8×10^9	2.1	0.75×10^9



ნახაზი 14. კ. ს „ნავთლული -220“ ტ-3 ტრ-ის ზეთის v/p დამოკიდებულება ტემპერატურაზე



ნახაზი 15. კ. ს „ნავთლული -220“ ტ-3 ტრ-ის ზეთის v დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

ამ ფაქტორების გამორიცხვის მიზნით ჩვენ აღნიშნულ ზეთს ჩავუტარეთ გაფილტვრა, ზემოთაღნიშნული მეთოდიკით თავისუფალი გადინებით, რის შედეგადაც მექანიკური მინარევების კლასი შეესაბამებოდა სტანდარტის X- კლასს და საგრძნობლად შემცირდა თითქმის ყველა ზომის ნაწილაკების რიცხვი (ცხრილი N10)

მაგრამ ამ გაფილტვრის შედეგად მისი ტენშემცველობა არ შეიცვალა და დარჩა ისევ 40 გრ/ტ. აღსანიშნავია ისიც, რომ ასეთი ზეთისათვის გაფილტვრის შემდეგ ტგდ-ს მნიშვნელობა 20 °C-ზე თითქმის 100-ჯერ შემცირდა, ხოლო 90 °C-ზე კი 6-ჯერ მეტად, ამასთანავე გამრღვევი ძაბვა 35 კვ-მდე გაიზარდა. ასეთი სახის ზეთისათვის განვსაზღვრეთ სხვადასხვა ტემპერატურაზე p , v , ტგდ და ვიანგარიშეთ v/p შეფარდება.

შედეგები მოყვანილია ცხრილ N16, სადაც ჩანს, რომ წინააღმდეგობა (p) თითქმის 20-40-ჯერ გაიზარდა, ხოლო სიბლანტე თითქმის არ შეცვლილა.

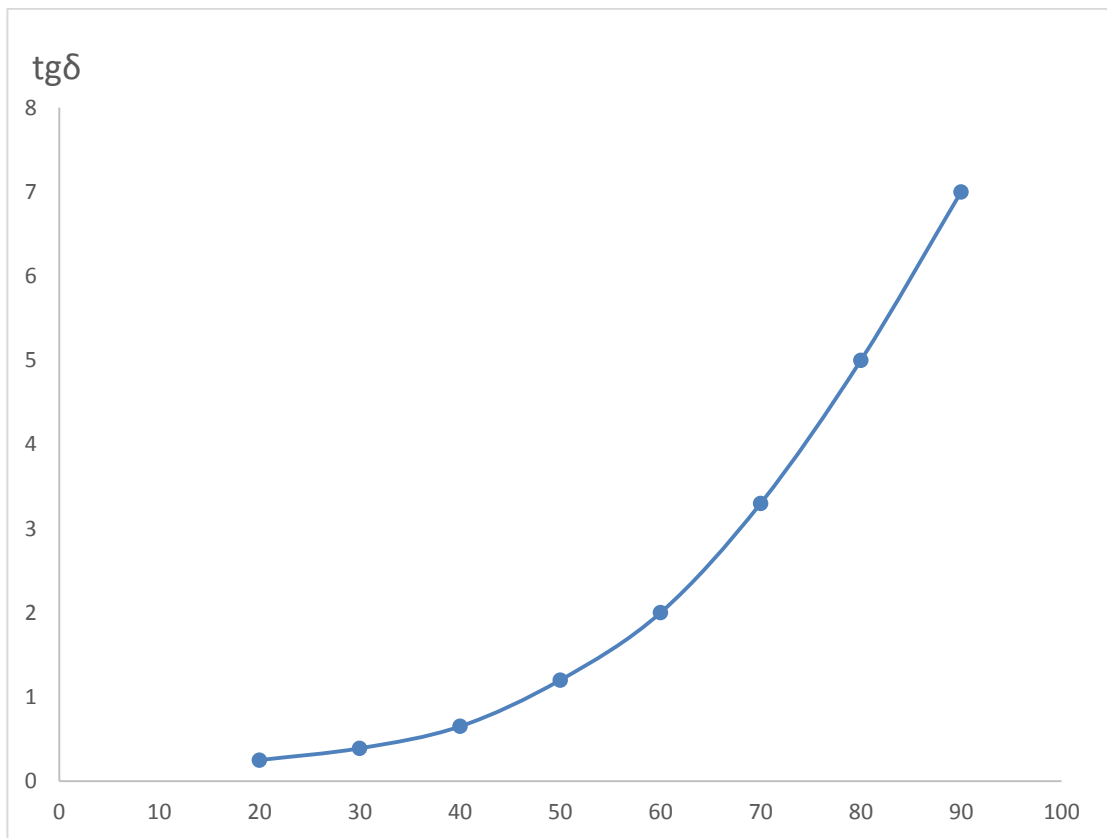
ცხრილი 10. ქ.ს „ნავთლული-220“-ის ზეთის მექ. მინარევების განაწილება ზომის მიხედვით თავისუფალი გადინებით, გაფილტვრის შემდეგ

			საწყისი	გაფილტვრული
1	გამრღვევი ძაბვა	კვ/2.5 მმ	28	39
2	ტგდ	T=20°C	15	0.13
		T=90°C	42	7
N	ნაწილაკების ზომები მიკრო მეტრი			
1	კლასი		XIII	X
2	Σ		816810	82860
3	2.5÷5 მკმ		306850	63195
4	5÷15 მკმ		403450	187495
5	15÷25 მკმ		86895	945
6	25÷50 მკმ		18400	205
7	50÷100 მკმ		1210	20
8	100÷200 მკმ		6	0
9	200÷500 მკმ		0	0

ცხრილი 11. ქ. ს „ნავთლული-220“ T-3 ტრანსფორმატორის ზეთის ν , p , $\text{tg}\delta$ სიდიდეები სხვადასხვა ტემპერატურაზე თავისუფალი გადინებით გაფილტვრის შემდეგ

N	$t/20$	ρ ომი.მ	ν ს.ს.ტ	$\text{tg}\delta$	ν/ρ
1	20	7.6×10^{10}	18.9	0.13	2.48×10^{-10}
2	30	4.4×10^{10}	10.7	0.39	2.43×10^{-10}
3	40	2.8×10^{10}	7.5	0.65	2.67×10^{-10}
4	50	1.6×10^{10}	5.5	1.4	3.43×10^{-10}
5	60	0.8×10^{10}	4.0	2.44	5×10^{-10}
6	70	0.5×10^{10}	3.2	3.3	6×10^{-10}
7	80	0.4×10^{10}	2.5	5.4	6.25×10^{-10}
8	90	0.28×10^{10}	2.1	7.0	7.5×10^{-10}

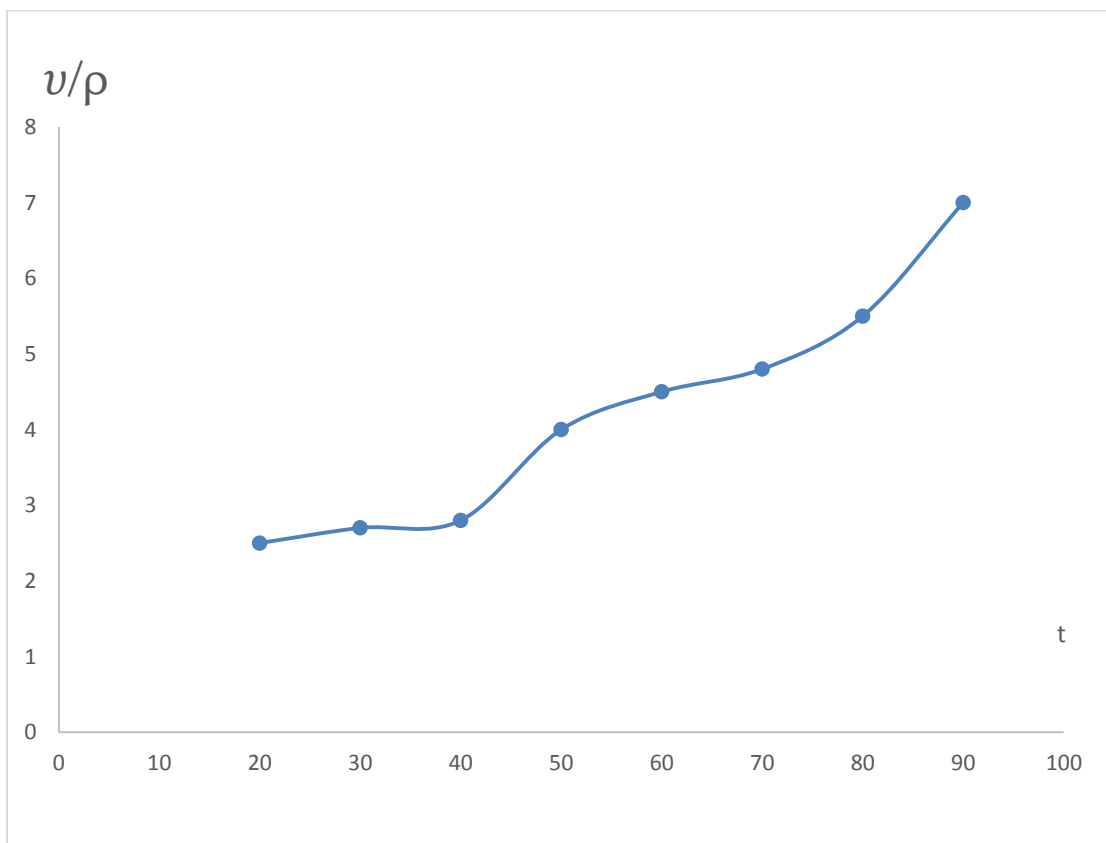
რომლის შედეგებითაც ავაგეთ $\text{tg}\delta$ -ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე (ნახაზი N15) და ν/p დამოკიდებულება ტემპერატურაზე (ნახაზი N16).



ნახაზი 16. ქ. ს „ნავთლული-220“-ის ტ-3 ტრ-ის ზეთის $\text{tg}\delta$ -ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, თავისუფალი გადინებით გაფილტვრის შემდეგ

ამ გრაფიკიდან კარგად ჩანს, რომ v/p 50 °C ტემპერატურაზე თითქმის არ იცვლება, ხოლო t გბ უმნიშვნელოდ იზრდება, რაც გახსნილი წყლის თავისუფალ წყალში გადასვლით არის განპირობებული.

ამ ფაქტორის გამორიცხვის მიზნით ჩვენ მოვახდინეთ იგივე გაფილტრული ზეთის ვაკუუმის ქვეშ $P = 50$ მმ.ვწ.სვ დამუშავება 10 წუთის განმავლობაში, ამაც საშუალება მოგვცა გარკვეულწილად ტენშემცველობა 40 გრ/ტ-დან 15 გრ/ტ-მდე შეგვემცირებინა, ამასთანავე მექანიკური მინარევების კლასი და რაოდენობა თითქმის უცვლელი იყო, მაგრამ საგრძნობლად გაიზარდა გამრღვევი ძაბვა, ხოლო სიბლანტეს ცვლილება არ განუცდია, შედეგები მოყვანილია ცხრილ N12

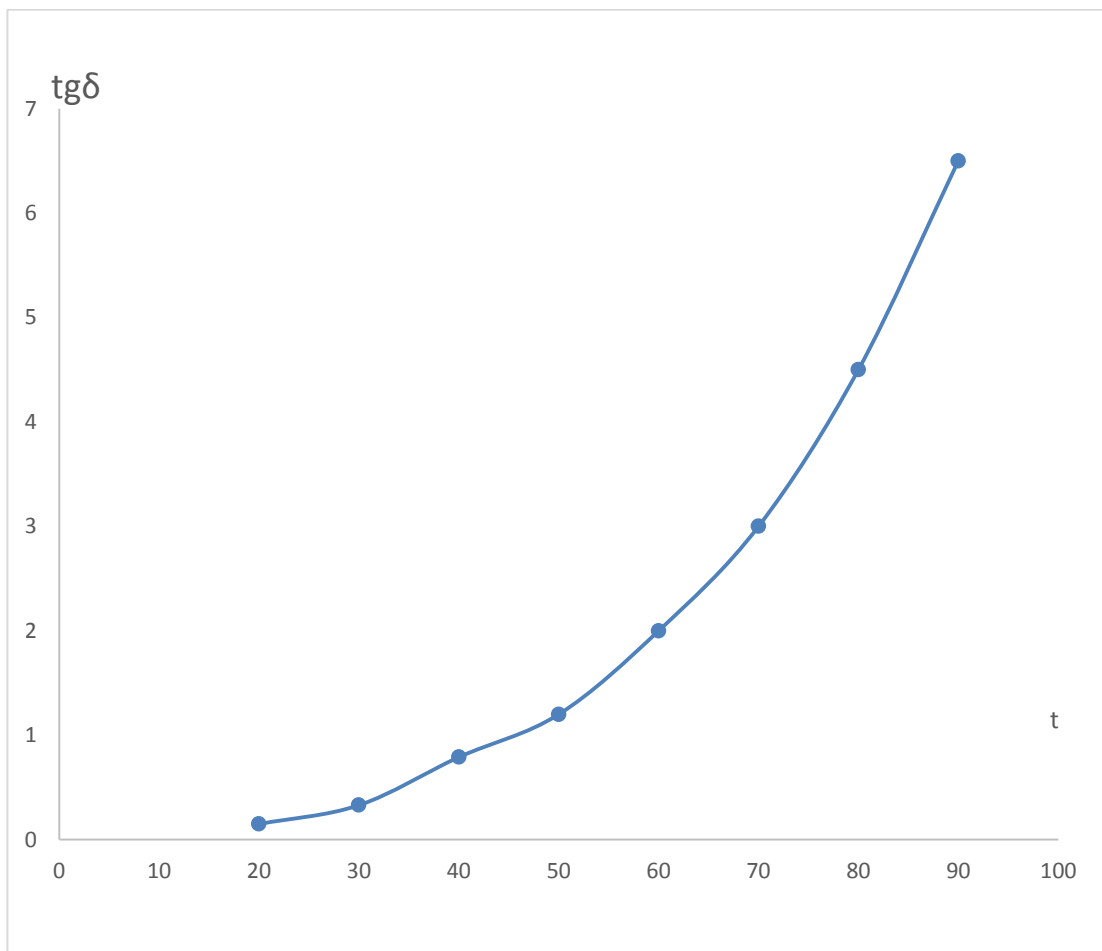


ნახაზი 17. ქ. ს „ნავთლული-220“-ის ტ-3 ტრ-ის ზეთის v/p -ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე, თავისუფალი გადინებით გაფილტვრის შემდეგ

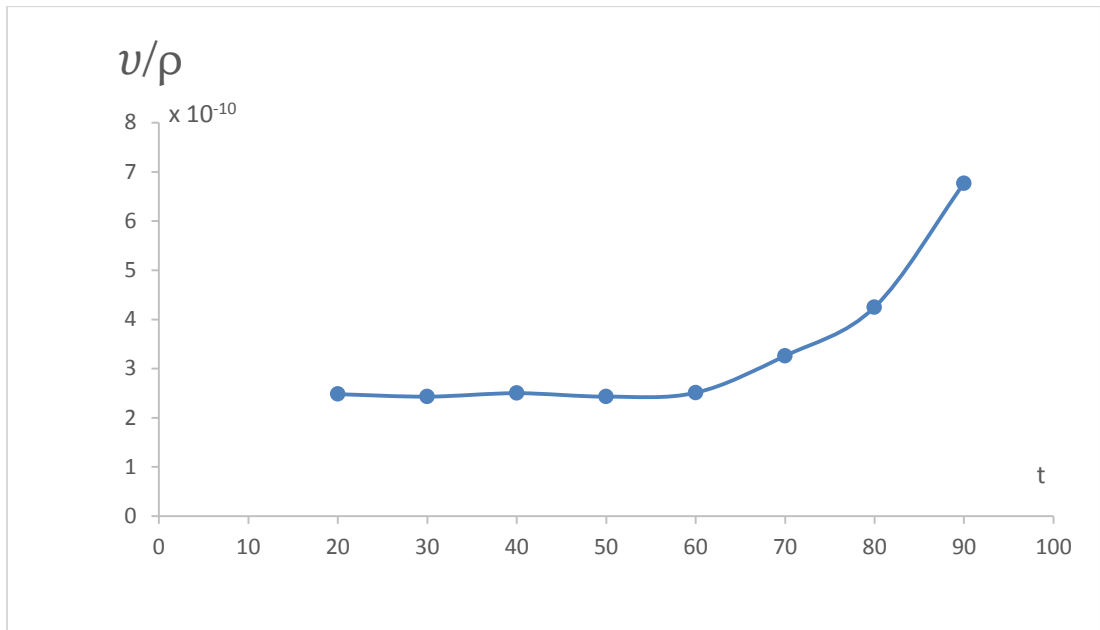
ცხრილი 12. ქ. ს „ნავთლული - 220“ ტ-3 ტრანსფორმატორის ზეთის, მახასიათებლები გაფილტვრისა და ვაკუუმირების შემდეგ

N	$t/20$	ρ ომი.მ	ν ს.სტ	tg δ	ν/ρ
1	20	7.6×10^{10}	18.9	0.1	2.48×10^{-10}
2	30	4.4×10^{10}	10.7	0.33	2.43×10^{-10}
3	40	3×10^{10}	7.6	0.79	2.5×10^{-10}
4	50	2.26×10^{10}	5.5	1.2	2.43×10^{-10}
5	60	1.57×10^{10}	4.0	2.0	2.51×10^{-10}
6	70	0.98×10^{10}	3.2	3.0	3.26×10^{-10}
7	80	0.58×10^{10}	2.5	4.5	4.25×10^{-10}
8	90	0.31×10^{10}	2.1	6.5	6.77×10^{-10}

ამ მონაცემებით ავსაგეთ tg δ -ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ნახაზი N17 და ν/ρ ნახაზი N18.



ნახაზი 18. ქ. ს „ნავთლული - 220“ T-3 ტრანსფორმატორის ზეთის, tg δ -ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე გაფილტვრისა და ვაკუუმირების შემდეგ



ნახაზი 19. ქ. ს „ნავთლული - 220“ T-3 ტრანსფორმატორის ზეთის, tგბ-ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე გაფილტვრისა და ვაკუუმირების შემდეგ

ამ დამოკიდებულებიდან ჩანს, რომ თითქმის 70 °C ტემპერატურამდე v/p - სიდიდე მართალია ახალი ზეთებისათვის მიღებულ სიდიდეს თითქმის 2-ჯერ აღემატება, მაგრამ ამ ტემპერატურულ ინტერვალში უცვლელი რჩება. ანალოგიური წინა გრაფიკთან შედარებით (ნახ. 17) v/p ცვლილების ტემპერატურამ მოიმატა, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ შემცირდა ტენის გავლენა, ხოლო tგბ თავისუფალ გადინებით გაფილტრულ ზეთთან შედარებით ვაკუუმირების გარეშე თითქმის ყველა ტემპერატურაზე შემცირდა. იმისათვის, რომ დავადგინოთ, როგორ იცვლება ტემპერატურათა სხვადასხვა დიაპაზონში v/p - სიდიდე, მოვახდინეთ მოცემული სიდიდის მნიშვნელობების შეფარდება $t = 20, 50$ და 80 °C-ისათვის. შედეგები მოყვანილია ცხრილ N12-ში. როგორც ცხრილიდან ჩანს 50 °C - ტემპერატურამდე მიუხედავად ზეთის მდგომარეობისა, აღნიშნული შეფარდების მნიშვნელობა მიახლოებით ერთის ტოლია, რაც კარგად ეთანხმება ფორმულა (7)-ის პირობებს. მაგრამ 50 °C -დან 80 °C-მდე ტემპერატურის გაზრდით აღნიშნული შეფარდება თითქმის 2-ჯერ მცირდება, რაც იმას ნიშნავს, რომ აღნიშნულ შეფარდებაში [კუთრი

წინააღმდეგობის შემცირება ტემპერატურის მიხედვით უფრო ძლიერ გავლენას ახდენს ვიდრე σ -ს შემცირება. ეს კი ადასტურებს მოსაზრებას, რომ ტემპერატურის გაზრდით ადგილი აქვს დენის მატარებელი ნაწილაკების რიცხვის გაზრდას, რაც სავარაუდოდ გამოწვეულია მინარევების დისოციაციით.

2.3. ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხის მაჩვენებელსა და სიმკვრივეს შორის ურთიერთკავშირი

ცნობილია, რომ სატრანსფორმატორო ზეთის თხევად ნეიტრალურ დიელექტრიკს წარმოადგენს, ამიტომ მასში ადგილი აქვს ელექტრონულ პოლარიზაციას. ხოლო ელექტრონული პოლარიზაციისას ნებისმიერ ტემპერატურაზე ფარდობით დიელექტრიკულ შეღწევადობასა და ამ სითხის ელექტრომაგნიტური ტალღის (სინათლის სხივის) გარდატეხის მაჩვენებელს შორის შემდეგი კავშირი არსებობს:

$$\varepsilon_t \approx (n_t)^2 \quad (36)$$

განსხვავება ამ ორ სიდიდეს შორის განპირობებულია მინარევებით, რომლებსაც ელექტრონული პოლარიზაცია არ ახასიათებს და ამ სხვაობას ვერმანის კოეფიციენტს უწოდებენ.

$$\varepsilon - n^2 = (V_k) \quad (37)$$

ეს სხვაობა ტრანსფორმატორის ზეთისათვის მნიშვნელოვან პარამეტრს წარმოადგენს და მისი სიდიდე ზეთის მდგომარეობას ახასიათებს. ვერმანის კოეფიციენტი სტანდარტითაა ნორმირებული და 0,01 დან 0,06 -მდე იცვლება. ახალი ზეთებისთვის ვერმანის კოეფიციენტის მინიმალური მნიშვნელობა მიღებულია 0,01-ს ტოლი იყოს. ექსპლოატაციაში მყოფი დაძველებული ზეთებისათვის კი მისი მნიშვნელობა 0,06- მდე იზრდება.

ტრანსფორმატორის ზეთის ექსპლოატაციის დროს, დაძველების შედეგად, წარმოიქმნება დიპოლური მოლეკულები, რომლებიც ზრდიან

დიელექტრიკული შეღწევადობის სიდიდეს. ამის გამო იზრდება ვერმანის კოეფიციენტიც V_k .

ცხრილი 13. ახალი ზეთები.

N	გარდატეხის მაჩვენებელი n	სიმკვრივე D	n-D
1	1.4700	0.8510	0.619
2	1.4702	0.8597	0.611
3	1.4705	0.8610	0.610
4	1.4705	0.8600	0.611
5	1.4727	0.8583	0.614
6	1.4728	0.8581	0.615
7	1.4730	0.8586	0.614
8	1.4733	0.8544	0.619
9	1.4740	0.8591	0.615
10	1.4748	0.8621	0.613
11	1.4749	0.8608	0.614
12	1.4751	0.8602	0.615
13	1.4754	0.8640	0.611
14	1.4754	0.8605	0.615
15	1.4757	0.8611	0.615
16	1.4764	0.8615	0.615
17	1.4765	0.8610	0.616
18	1.4766	0.8623	0.614
19	1.4779	0.8622	0.615
20	1.4771	0.8607	0.616
21	1.4776	0.8617	0.616
22	1.4779	0.8602	0.617
23	1.4779	0.8621	0.616

ვერმანის კოეფიციენტის გაზრდა მიუთითებს, რომ ზეთში გაიზარდა ბმული წყლის ან დამკვლავების დიპოლური პროდუქტების რაოდენობა. ამ მოვლენების შესაფასებლად აუცილებელია დიდი სიზუსტით

განსაზღვროს დიელექტიკული შეღწევადობის ϵ და გარდატეხის მაჩვენებლის n მნიშვნელობები. ამასთანავე უნდა გავითვალისწინოთ ისიც, რომ ϵ და n წარმოადგენს ტრანსფორმატორის ზეთის ერთ-ერთ საიდენტიფიკაციო პარამეტრს, ამიტომ მათი განსაზღვრისას სიზუსტეს დიდი მნიშვნელობა აქვს.

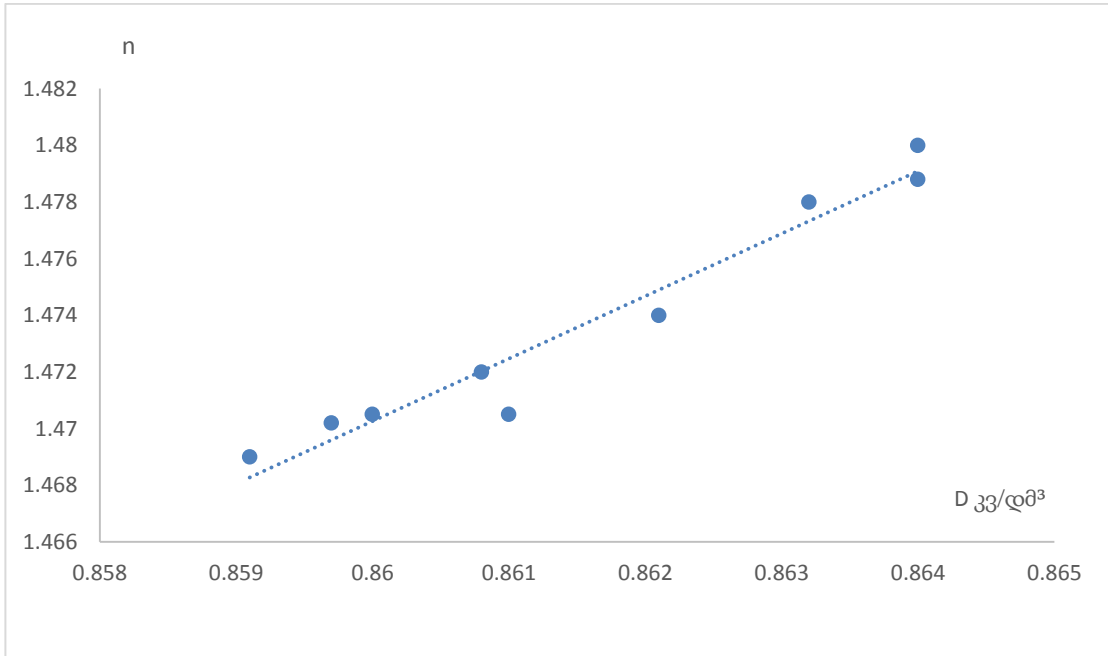
ჩვენს მიზანს წარმოადგენს n -ის სიდიდის განსაზღვრისას მაკონტროლებელი მექანიზმის შემუშავება, ანუ მისი დაკავშირება სხვა მახასიათებლებთან. ამ თვალსაზრისით მიზანშეწონილად ჩავთვალეთ დაგვედგინა ურთიერთკავშირი n -სა და სატრანსფორმატორო ზეთის სიმკვრივეს D -ს შორის. ანუ დაგვედგინა რა დამოკიდებულება მოცემული ზეთისთვის ერთსა და იმავე ტემპერატურაზე n_t -სა და D_t -ს შორის. ეს მოსაზრება გამართლებულია იმით, რომ სითხის გარდატეხის მაჩვენებელზე გარკვეულად გავლენას ახდენს სითხის სიმკვრივე.

ამ მიზნით ჩვენს მიერ აგებული იყო დამოკიდებულების გაფიკი $n = f(D)$ -ს, ახალი და ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისთვის ცალ-ცალკე კოორდინატთა სისტემაში. მიღებული შედეგები განსაზღვრა $T=20$ °C ტემპერატურაზე.

გრაფიკზე მოყვანილია ახალი ზეთებისთვის გარდატეხის მაჩვენებლისა და n სა და სიმკვრივეს შორის დამოკიდებულების გრაფიკი საიდანაც ჩანს რომ D -ს სიდიდე მცირე დიაპაზონში იცვლება, ხოლო n ის ცვლილების დიაპაზონი უფრო დიდია. ამასთანავე ერთი და იგივე ზეთისთვის $n - D$ სიდიდე 0,610-0,619 ფარგლებში იცვლება, ანუ მცირე გაშლა გააჩნია და მინიმუმ და მაქსიმუმს შორის სხვაობა იმდენად მცირეა (0.009) რომ გაზომვის ცდომილების თანაზომადია(გაზომვის ცდომილება ± 0.0001), ხოლო დამოკიდებულების გრაფიკი თითქმის სწორხაზოვანია.

ნამუშევარი ზეთებისთვის სიმკვრივისა და გარდატეხის მაჩვენებლის ცვლილების დიაპაზონი გაზრდილია, მაგრამ მათ შორის სწორხაზოვანი დამოკიდებულება შენარჩუნებულია, ხოლო სიდიდე $n - D$ იცვლება 0,597-0,611 ფარგლებში. ახალ ზეთებთან შედარებით მეტი გაშლა გააჩნია და

მინიმუმსა და მაქსიმუმს შორის სხვაობა თითქმის 55%-ით არის გაზრდილი, რაც ექსპლუატაციის ზეთის თვისებების ცვლილებით აისახება.



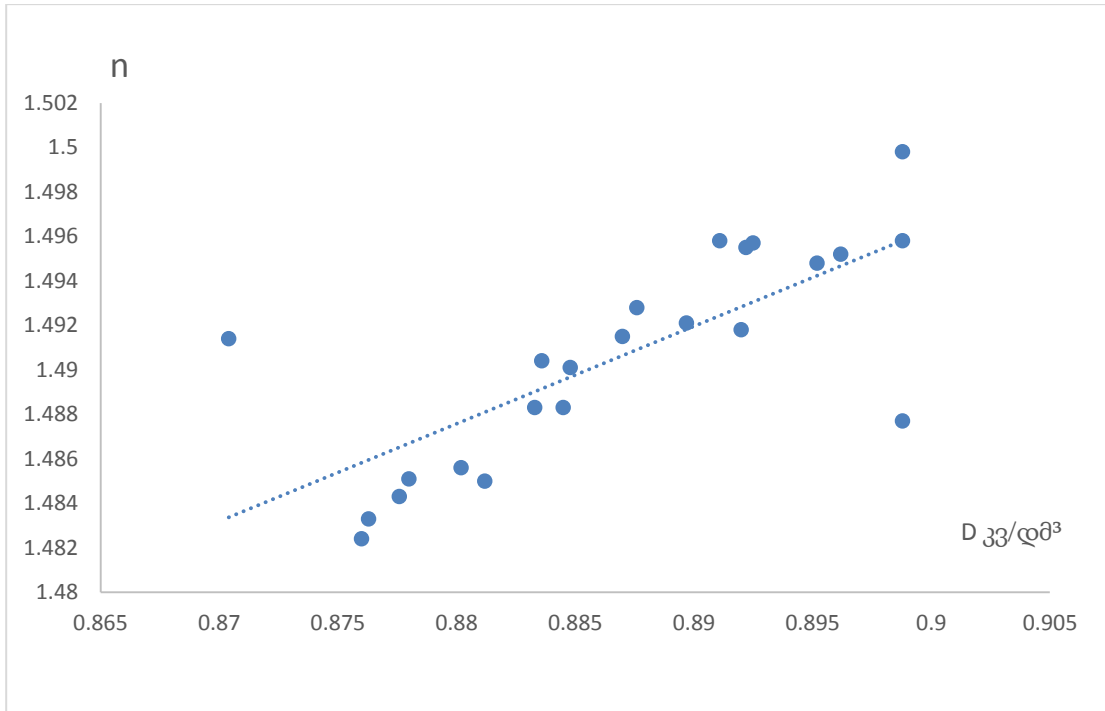
ნახაზი 20. $n = f(D)$ -ახალი ზეთებისთვის

რა თქმა უნდა მცირე რაოდენობის წერტილები ამ ზოგადი კანონზომიერებიდან ამოვარდნილია, რაც მათი ბუნებიდან გამომდინარეობს, მაგრამ ეს საერთო სურათს და დამოკიდებულობის კანონზომიერებას არ ცვლის.

[ჩვენს მიერ მრავალი ცდის დამუშავების შემდეგ დავასკვნით, რომ თუ ლაბორატორიაში მიღებული n –სა და D –ს სიდიდეებს შორის სხვაობა ზემოთ აღნიშნული დიაპაზონიდან გადის (ცალ ცალკე ახალი და ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისათვის), მაშინ დიდი ალბათობაა იმისა, რომ ამ ორი პარამეტრიდან ერთ-ერთი არასწორადაა განსაზღვრული და საჭიროა მისი გადამოწმება, ან და ტრანსფორმატორის ზეთში მოხდა ისეთი ცვლილება, რომელმაც ანომალურად შეცვალა ამ პარამეტრებიდან ერთ-ერთი.

ცხრილი 14. ძველი ნამუშევარი ზეთები

N	გარდატეხის მაჩვენებელი n	სიმკვრივე D	n-D
1	1.4824	0.8760	0.606
2	1.4833	0.8763	0.607
3	1.4843	0.8776	0.607
4	1.4850	0.8812	0.604
5	1.4851	0.8780	0.606
6	1.4856	0.8802	0.607
7	1.4883	0.8833	0.605
8	1.4883	0.8845	0.604
9	1.4877	0.8988	0.589
10	1.4901	0.8848	0.605
11	1.4904	0.8836	0.607
12	1.4914	0.8704	0.604
13	1.4915	0.8870	0.605
14	1.4918	0.892	0.603
15	1.4921	0.8897	0.603
16	1.4928	0.8876	0.605
17	1.4948	0.8952	0.599
18	1.4952	0.8962	0.599
19	1.4955	0.8922	0.603
20	1.4957	0.8925	0.603
21	1.4958	0.8911	0.605
22	1.4958	0.8988	0.597
23	1.4998	0.8988	0.601



ნახაზი 21. $n = f(D)$ -ძველი ნამუშევარი ზეთებისთვის

თუკი სატრანსფორმატორო ზეთის სიმკვრივე და გარდატეხის მაჩვენებელი არ იქნება ზუსტად განსაზღვრული, მაშინ შესაბამისად ზუსტად ვერ განვსაზღვრავთ: ვერმანის კოეფიციენტს, რომელიც დაკავშირებულია გარდატეხის მაჩვენებელთან, ზედაპირული დაჭიმულობას, რომელიც სიმკვრივესთანაა დაკავშირებული და აგრეთვე სხვა პარამეტრებსაც. ამიტომ დასკვნის გაკეთების დროს ეს მოსაზრებაც გათვალისწინებული უნდა იყოს.

2.4. ტრანსფორმატორის ზეთის მჟავურ რიცხვსა და ზედაპირულ დაჭიმულობას შორის ურთიერთკავშირი

ტრანსფორმატორის ზეთის მჟავური რიცხვი გვიჩვენებს რა რაოდენობითაა ზეთში დიპოლური ნაწილაკები, რომლებიც წარმოადგენენ ორგანულ მჟავებს ან მეტალორგანულ შენაერთებს, რომლებიც მჟავურ ბუნებას ავლენენ და სხვადასხვა ფაქტორის ზეგავლენით მათი რაოდენობა

იზრდება. ამიტომ მისი სიდედე სტანდარტითაა ნორმირებული და ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისთვის 0.3 -ს არ უნდა აღემატებოდეს. მჟავური რიცხვის გაზრდა ზეთში დაძველების პროცესის დაწყებაზე მიუთითებს, რის შედეგადაც უარესდება ზეთის სხვა პარამეტრები. ამასთანავე მაღალი მჟავური რიცხვის მქონე ზეთები იწვევენ ტრანსფორმატორის მყარი იზოლაციის დაძველებას და მისი როგორც ელექტრული ასევე მექანიკური თვისებების გაუარესებას. ნორმაზე მეტი მჟავური რიცხვის მქონე ზეთები არასაექსპლუატაციო ზეთებად ითვლებიან და აუცილებელია მათი ექსპლუატაციიდან გამოყვანა.

სავარაუდოდ, მჟავური რიცხვი გარკვეულწილად უკავშირდება ზეთის სხვა პარამეტრებს, როგორებიცაა: გარდატეხის მაჩვენებელი, დიელექტრიკული დანაკარგები (tgδ), მაგრამ მათ შორის პირდაპირი კავშირი ექსპერიმენტალური მონაცემებით ძნელი დასადგენია, რადგან ერთდოულად მრავალი ფაქტორის არსებობა საშუალებას არ გვაძლევს ცალსახად დავადგინოთ ურთიერთდამოკიდებულება ამ პარამეტრებს შორის.

სავარაუდოდ, მჟავური რიცხვი უკავშირდება (ან უნდა უკავშირდებოდეს) ზეთის ზედაპირულ დაჭიმულობას, რადგანაც მჟავური რიცხვის განმაპირობებელი ნივთიერებები - ორგანული მჟავები ზედაპირულ აქტიური ნივთიერებებია. ისინი ყოველთვის თავს იყრიან ორი ფაზის გამყოფ ზედაპირზე. ამის გამო მოსალოდნელია, რომ ზეთებს, რომლებსაც გააჩნიათ მაღალი მჟავური რიცხვი უნდა ახასიათებდეთ შედარებით დაბალი ზედაპირული დაჭიმულობის მნიშვნელობა.

ლიტერატურიდან ცნობილია, რომ ზედაპირული დაჭიმულობა (σ) ძალიან მგრძნობიარეა ზეთის დაძველების პროდუქტების მიმართ დაძველების დაწყებისთანავე იგი შემცირებას იწყებს.

საზღვარგარეთ ზეაპირული დაჭიმულობის სიდიდის განსაზღვრა ტრანსფორმატორის ზეთისათვის დიდი ხანია წარმოებს, ხოლო ბოლო 5

წელია დანერგეს და შეტანილ იქნა რუსეთისა და უკრაინის ნორმატიულ დოკუმენტში.

მათ შორის კავშირის დადგენა თეორიული გზით თითქმის შეუძლებელი აღმოჩნდა, ამიტომ ჩვენ მივმართეთ გრაფიკულ მეთოდს, კერძოდ: ერთი და იგივე ზეთისათვის მიღებული მჟავური რიცხვისა და ზედაპირის დაჭიმულობის ურთიერთდამოკიდებულობის გრაფიკების აგებით, როგორც საექსპლუატაციო, ასევე ახალი ზეთებისათვის. ამ დამოკიდებულებების გრაფიკიდან ცალსახად ჩანს, რომ ახალ ზეთებს გააჩნიათ ზედაპირული დაჭიმულობა, რომლის სიდიდე 35მნ/მ-ს აღემატება (II) უბანი, ხოლო შესაბამისი მჟავური რიცხვის სიდიდე 0,015 მგ KOH/გრ ზეთზე ნაკლებია.

სხვადასხვა მარკის ზეთებისათვის არსებობს განსხვავება, რაც სავარაუდოდ ზეთის წარმომავლობით და ბუნებითაა განპირობებული. ამიტომ ამ უბანზე ცალსახად გრაფიკული დამოკიდებულობის გამოხატვა შეუძლებელი აღმოჩნდა. ერთი კი ნათელია, რომ რაც მეტია ზედაპირული დაჭიმულობა მით ნაკლებია მჟავური რიცხვი და პირიქით.

ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისათვის, რომლებშიც დაძველების პროცესი ჯერ კიდევ არ დაწყებულა იგივე კანონზომიერება შეიმჩნევა მჟავური რიცხვისა და ზედაპირულ დაჭიმულობასა შორის. ხოლო ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისათვის, რომლებშიც დაძველების პროცესი დაწყებულია, მჟავური რიცხვის სიდიდე 0.03 KOH/გრ ზეთზე აღემატება და ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდე კი ცალსახად 35 მნ/მ ზე ნაკლებია.

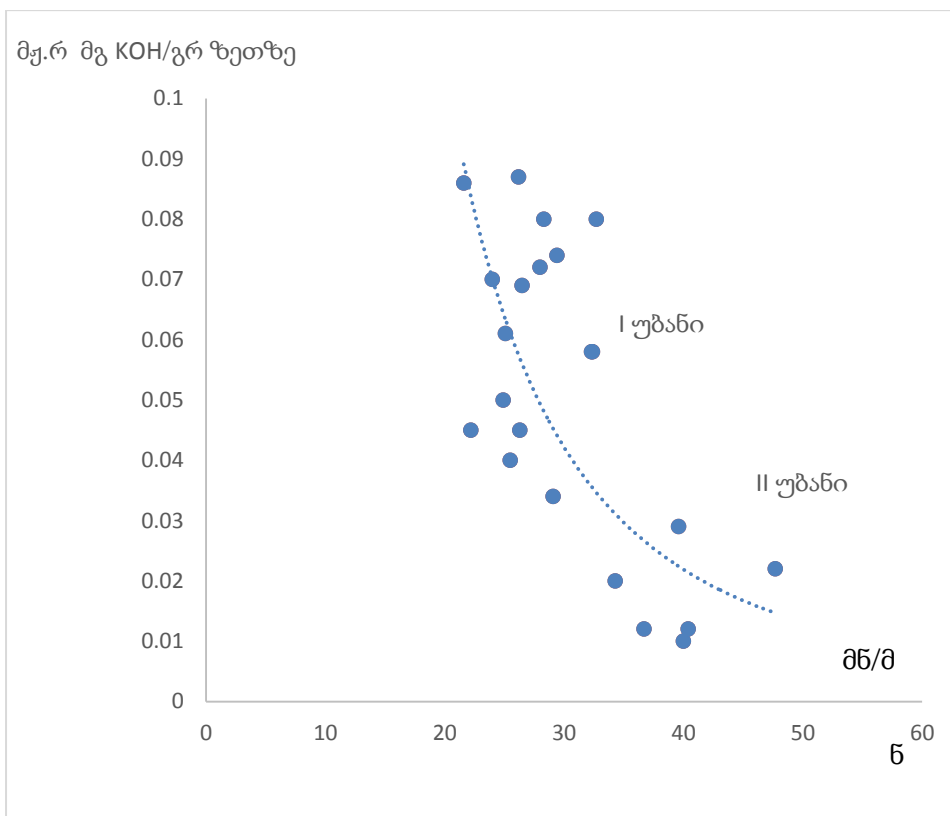
ეს ნიშნავს, რომ [ზეთში წარმოქმნილმა დაძველების პროდუქტებმა არამარტო მჟავური რიცხვის გაზრდა არამედ ზედაპირული დაჭიმულობაც შეამცირა. გრაფიკი უბანი (I) ხასიათდება როგორც მჟავური რიცხვის ცვლილების დიდი დიაპაზონით, ასევე ზედაპირული დაჭიმულობაც დიდ ფარგლებში იცვლება, რაც სავარაუდოდ, დაძველების პროდუქტების სხვადასხვა ბუნებითაა განპირობებული, ან ზეთების სხვადასხვა მარკირებითაა (წარმომობა) გამოწვეული.

ცხრილი 15. ტრ-ის ზეთის ზედაპირულ დაჭიმულობასა და მჟავურ რიცხვს შორის კავშირი

N	ზედაპირული დაჭიმულობა (მნ/მ)	მჟავური რიცხვი მგ KOH/გრ ზეთზე
1	45.0	0.0010
2	47,9	0.0015
3	45.6	0.0016
4	45.5	0.0019
5	45.1	0.0022
6	49.1	0.0030
7	46.3	0.0030
8	41.3	0.0032
9	42.8	0.0033
10	43.0	0.0034
11	48.7	0.0034
12	44.3	0.0035
13	38.6	0.0038
14	44.7	0.0039
15	47.4	0.0042
16	44.3	0.0045
17	46.4	0.0048
18	44.5	0.0048
19	48.9	0.0050
20	42.2	0.0052
21	44.9	0.0056
22	41.6	0.0058
23	44.7	0.0059
24	43.4	0.0068
25	46.6	0.0077
26	31.3	0.0087
27	41.4	0.010
28	40.0	0.010
29	36.7	0.012
30	40.4	0.012

31	34.3	0.020
32	47.7	0.022
33	39.6	0.029
34	29.1	0.034
35	25.5	0.040
36	26.3	0.045
37	22.2	0.045
38	24.9	0.050
39	32.3	0.058
40	32.4	0.058
41	25.1	0.061
42	26.5	0.069
43	24.0	0.07
44	28.0	0.072
45	29.4	0.074
46	28.3	0.080
47	32.7	0.080
48	21.6	0.086
49	26.2	0.087
50	22.2	0.088

გასათვალისწინებელია, რომ ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთები სხვადასხვა მარკის ზეთების ნარევს წარმოადგენს, რომელთა აღრიცხვაც პრაქტიკულად არ არსებობს. ამიტომ ამ უბანზეც (I უბანი) შეუძლებელი გახდა გრაფიკული დამოკიდებულების დადგენა. ზოგიერთი ზეთი ამოვარდა ზოგადი კანონზომიერებიდან, რაც განპირობებულია ან ცდის ცდომილებით ან ზეთის ბუნებით, მაგრამ ასეთი წერტილების რაოდენობა იმდენად მცირეა, რომ ზოგად კანონზომიერებას არ ცვლის.



ნახაზი 22. მკავეური რიცხვი = $f(n)$

ამასთანავე აღსანიშნავია, რომ დამოკიდებულების მრუდზე გარდატეხის წერტილის არსებობა, პირველ და მეორე უბანს შორის ზეთში თვისობრივ ცვლილებაზე ანუ ზეთის დაძველებაზე მიუთითებს, რაც ზემოთაღნიშნულ მოსაზრებას ერთხელ კიდევ ადასტურებს.

თავი 2-ის შედეგები და მათი განსჯა

მაღალი ტენშემცველობის და დიდი რაოდენობით მექანიკური მინარევების მქონე ზეთებში გაფილტვრითა და ტენშემცველობის შემცირებით tგდ- სიდიდე მნიშვნელოვნად მცირდება, კუთრი წინააღმდეგობა - იზრდება და სხვა ელექტრული მახასიათებლები უმჯობესდებიან, მაგრამ v/p სიდიდე მაღალი ხარისხის ზეთების მიღებულ სიდიდეს თითქმის 2-ჯერ აღემატება და გარკვეულ ტემპერატურაზე შეინიშნება აღნიშნული შეფარდების მნიშვნელობის მკვეთრი ზრდა. როდესაც აღნიშნული დამუშავება კერძოდ: ფილტრაცია, ვაკუუმირება v -ს

ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკზე მნიშვნელოვან გავლენას არ ახდენს, რაც იმაზე მიგვითითებს, რომ ტრანსფორმატორის ზეთებში რჩება ისეთი ნაწილაკები, რომლებიც მიუხედავად ხარისხიან ფილტრში გავლის შემდეგაც კი ტრანსფორმატორის ზეთში გახსნილი რჩებიან.

ევროპული და რუსული წარმოების საუკეთესო ხარისხის ზეთებისათვის v/p შეფარდება ტემპერატურის გაზრდით უცვლელი სიდიდეა, რაც ტემპერატურის მატებით დენის მატარებლების რიცხვის უმნიშვნელო გაზრდაზე მიუთითებს.

რაც მაღალ ტემპერატურაზე მოხდება v/p -ს ფარდობის სიდიდის ზრდა, მით კარგი ხარისხისაა ტრანსფორმატორის ზეთი.

[თუ ტრანსფორმატორის ზეთი ხასიათდება მაღალი ტენშემცველობით და მექანიკური მინარევების დიდი რაოდენობით, მაშინ მისი გამრღვევი ძაბვის სიდიდე აუცილებლად მცირე იქნება და იგი შეესაბამება I უბანს (ნახ.12). ხოლო თუ ზეთი ხასიათდება მცირე ტენშემცველობით და მექანიკური მინარევების მცირე რაოდენობით, მაშინ სავარაუდოა, რომ დიდი ალბათობით მისი გამრღვევი ძაბვის სიდიდე მაღალი იყოს და შეესაბამებოდეს III უბანს. ხოლო მათ შორის შეიძლება იყოს შუალედური მდგომარეობა II უბანი. ლაბორატორიაში ცდების ჩატარებისას ეს მოსაზრება აუცილებლად გასათვალისწინებელია.]

[კუთრი წინააღმდეგობის შემცირება ტემპერატურის მიხედვით უფრო ძლიერ გავლენას ახდენს ვიდრე σ -ს შემცირება. ეს კი ადასტურებს მოსაზრებას, რომ ტემპერატურის გაზრდით ადგილი აქვს დენის მატარებელი ნაწილაკების რიცხვის გაზრდას, რაც სავარაუდოდ გამოწვეულია მინარევების დისოციაციით.]

[ჩვენს მიერ მრავალი ცდის დამუშავების შემდეგ დავასკვნით, რომ თუ ლაბორატორიაში მიღებული n – სა და D –ს სიდიდეებს შორის სხვაობა ზემოთ აღნიშნული დიაპაზონიდან გადის (ცალ ცალკე ახალი და ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისათვის), მაშინ დიდი ალბათობაა იმისა, რომ ამ ორი პარამეტრიდან ერთ-ერთი არასწორადაა განსაზღვრული და

საჭიროა მისი გადამოწმება, ან და ტრანსფორმატორის ზეთში მოხდა ისეთი ცვლილება, რომელმაც ანომალურად შეცვალა ამ პარამეტრებიდან ერთ-ერთი.

თუკი სატრანსფორმატორო ზეთის სიმკვრივე და გარდატეხის მაჩვენებელი არ იქნება ზუსტად განსაზღვრული, მაშინ შესაბამისად ზუსტად ვერ განვსაზღვრავთ: ვერმანის კოეფიციენტს, რომელიც დაკავშირებულია გარდატეხის მაჩვენებელთან, ზედაპირული დაჭიმულობას, რომელიც სიმკვრივესთანაა დაკავშირებული და აგრეთვე სხვა პარამეტრებსაც. ამიტომ დასკვნის გაკეთების დროს ეს მოსაზრებაც გათვალისწინებული უნდა იყოს.]

[ზეთში წარმოქმნილმა დაძველების პროდუქტებმა არამარტო მჟავური რიცხვის გაზრდა არამედ ზედაპირული დაჭიმულობაც შეამცირა. გრაფიკი უბანი (I) ხასიათდება როგორც მჟავური რიცხვის ცვლილების დიდი დიაპაზონით, ასევე ზედაპირული დაჭიმულობაც დიდ ფარგლებში იცვლება, რაც სავარაუდოდ, დაძველების პროდუქტების სხვადასხვა ბუნებითაა განპირობებული, ან ზეთების სხვადასხვა მარკირებითაა (წარმოშობა) გამოწვეული. გასათვალისწინებელია, რომ ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთები სხვადასხვა მარკის ზეთების ნარევეს წარმოადგენს, რომელთა აღრიცხვაც პრაქტიკულად არ არსებობს. ამიტომ ამ უბანზეც (I უბანი) შეუძლებელი გახდა გრაფიკული დამოკიდებულების დადგენა. ზოგიერთი ზეთი ამოვარდა ზოგადი კანონზომიერებიდან, რაც განპირობებულია ან ცდის ცდომილებით ან ზეთის ბუნებით, მაგრამ ასეთი წერტილების რაოდენობა იმდენად მცირეა, რომ ზოგად კანონზომიერებას არ ცვლის. ამასთანავე აღსანიშნავია, რომ დამოკიდებულების მრუდზე გარდატეხის წერტილის არსებობა, პირველ და მეორე უბანს შორის ზეთში თვისობრივ ცვლილებაზე ანუ ზეთის დაძველებაზე მიუთითებს, რაც ზემოთაღნიშნულ მოსაზრებას ერთხელ კიდევ ადასტურებს.]

დასკვნა

1. ახალი და ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისათვის, რომლებიც საექსპლუატაციო მოთხოვნებს აკმაყოფილებენ v/p ტემპერატურის 20 ± 50 °C-ის ინტერვალში მუდმივი სიდიდე არ არის და ტემპერატურის გაზრდით მიახლოებით 1.8-ჯერ იზრდება, როდესაც სიბლანტე ტემპერატურის ამ ინტერვალში 3-ჯერ მცირდება, რაც სავარაუდოდ გამოწვეულია იმ ნაწილაკების არსებობით, რომლებიც ტემპერატურის გაზრდით დისოციაციას განიცდიან.

2. მექანიზმი, რომელიც გავლენას ახდენს კუთრ გამტარებლობაზე გავლენას ვერ ახდენს სიბლანტეზე ეს კი იმაზე მეტყველებს, რომ მიუხედავად ზეთის გაფილტვრის და დამუშავებისა მასში მაინც რჩებიან ისეთი ნაწილაკები, რომლებიც ტრანსფორმატორის ზეთში გახსნილი არიან და გარკვეულ ტემპერატურებზე აქტივირდებიან.

3. სავარაუდოა, რომ გარკვეულ ტემპერატურაზე p -ს მკვეთრი შემცირება ამ ნაწილაკების დისოციაციითაა გამოწვეული. ეს მოსაზრება იმითაც შეიძლება დამტკიცდეს, რომ ტრანსფორმატორის ზეთში მექანიკური მინარევების შეფასების არსებული სტანდარტი არ ითვალისწინებს მინარევების ელექტრულ თვისებებს.

4. ექსპერიმენტალური მონაცემების დამუშავების საფუძველზე n – სა და D –ს სიდიდე ახალი ზეთებისათვის მოთავსებულია 0.610 ± 0.619 -ის, ხოლო ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისათვის კი 0.597 ± 0.611 დიაპაზონში.

5. ახალი ან კარგ საექსპლუატაციო პირობებში მყოფი ზეთებისათვის ზედაპირული დაჭიმულობის სიდიდე 35 მნ/მ-ს აღემატება და ისინი დაბალი მჟავური რიცხვით ხასიათდებიან. ხოლო ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთები, რომლებშიც დაძველების პროცესი უკვე მიმდინარეობს, ხასიათდებიან მცირე ზედაპირული დაჭიმულობით (< 35 მნ/მ) და მაღალი მჟავური რიცხვით. ამ ზოგადი კანონზომიერებიდან გადახრისას საჭიროდ მიგვაჩნია ცდის განმეორება ან ზეთის სხვა პარამეტრების დაზუსტება.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Богородицкий Н. П., Пасынков Б. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. Л.: «Энергия», 1977, 310 с.
2. Гост 6370-83. Нефть, Нефтепродукты и присадки. Метод опеределения механических премесей. 18 с.
3. Сканапи Г. И. Физика диелектриков. М.: «Гостехиздат», 1949, 250 с.
4. Липштейн Р.А., Шахшнович М. Н. Трансформаторное Масло. М.: «Энергоатомиздат», 1983, 295 с.
5. Липштейн. Р. А., Пуиковский В. В., Хромова Г. В. Повышение надежности электрооборудования энергосистем. Иваново: Ивановский энергетический институт, 1973, 388 с.
6. Гост 6581-75 Материалы электроизоляцииные жидкие, методы электрических испытаний. 21 с.
7. Рд 34/43/107-95 Объем и нормы испытаний электрооборудования. 80 с.
8. Гост 6581-85 - საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისიის N247 პუბლიკაცია. 108 გვ.
9. Гост 982-80 Масло трансформаторные. технические условия. 18 с.
10. Гост 10121-76 Масло Трансформаторное селективной очистки. технические условия. 126 с.
11. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. Москва: «Энергия», 1964, 320 с.
12. Брай И.В. Регенерация Трансформаторных масел. Москва: «Химия», 1972, 165 с.
13. ჩიხლაძე რ., ნაცვლიშვილი კ. ელექტროტექნიკური მასალები. თბილისი: „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2007, 288 გვ.
14. Рыбак Б.М., Анализ нефти и нефтепродуктов. Москва: «Химия», 1962, 882 с.

15. ГОСТ 26098-84, нефтепродукты, термины и определения. Москва: «Изд. стандартов», 1984, 12 с.
16. ГОСТ 3900-85, нефть и нефтепродукты, методы определения плотности. Москва: «Изд. стандартов», 1991, 37 с.
17. ГОСТ 20284-74, Нефтепродукты, методы определения цвета на колориметре ЦНТ. Москва: «Изд. стандартов», 2000, 9с.
18. ГОСТ 33-2000, Нефтепродукты: определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости. Минск: «Метрология», 19с.
19. ГОСТ 2719-2008, Нефтепродукты, методы определения температуры вспышки в закрытом тигле пенски-мартенса. Москва: «Стандартинфо», 2008, 26 с.
20. РД 34.43.205-95 Масла нефтяные трансформаторные. Экспресс-метод определения поверхностного напряжения масел на границе с водой. Москва: «ЕЭС России», 2005, 5 с.
21. ГОСТ 6581-75, Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. Москва: «Изд. стандартов», 2002, 25 с.
22. Крейн С. Э., Кулакова Р.В. Нефтяные изоляционные масла. Москва: «Химия», 2001, 143 с.
23. Вайда Д. Исследования повреждений изоляций. Москва: «Энергия», 1968, 394 с.
24. Кока И. А. Пробой жидких электроизоляционных материалов. Москва: «Энергия», 1967, 80 с.
25. Алексеев Б. А. Контроль состояния (диагностики) крупных силовых трансформаторов. Москва: «Издательство НЦ ЭНАС», 2002, 211с.
26. Динамика увлажнения изоляций в трансформаторе. Electrical World, №6, 1007, с. 72-80.
27. ГОСТ 24874, Бумага электроизоляционная трансформаторная. Технические условия. 34 с.
28. ჩიხლაძე რ., ნაცვლიშვილი კ., გუგავა ც. ტრანსფორმატორის მყარი იზოლაციის ნარჩენი საექსპლუატაციო რესურსის განსაზღვრა. „ენერჯია“, 2002, №4, გვ. 8-15.

29. Трансформаторы. Перенапряжения и координация изоляций. Пер. докл. междунар. конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-84) Под. ред. Лузинова С. Д. и Лоханина А. К. М.: «Энергоатомиздат», 1996, 245 с.
30. Шахнович М. И. Синтетические жидкости для электрических аппаратов. Москва: «Энергия», 1972, 218 с.
31. IEC 1169-97 Standard Test Method for Specific Resistance (Resistivity) of Electrical Insulating Liquids. 1997, 44 p.
32. Мост переменного тока М 5026М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Москва: 2001, 28 с.
33. ჩიხლაძე რ. იზოლაციის ელექტრული გამოცდა და დიაგნოსტიკა. თბილისი: „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2010, 294 გვ.
34. РД. 34.45.51. 300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования. Москва: «Издательство НЦ ЭНАС», 2002, 255 с.
35. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Москва: «Энергия», 1979, 320 с.
36. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. Москва: «ОРГРЕС», 2001, 491 с.
37. Сканави Г. А. Физика диэлектриков (область сильных полей). Москва: «Энергия», 1958, 907 с.
38. ჩიხლაძე რ., გურასპაშვილი გ., ჩიხლაძე ქ. ტრანსფორმატორის ზეთის ხარისხის შეფასება ν/ρ სიდიდით. სტუ-ის შრომები, 2012, N4, გვ 9-12.
39. ჩიხლაძე რ., გურასპაშვილი გ., ჩიხლაძე ქ. ტრანსფორმატორის ზეთის რეფრაქციის კოეფიციენტისა და სიმკვრივეს შორის კავშირი. სტუ-ის შრომები, 2012, N4, გვ. 13-15.
40. გურასპაშვილი გ. ტრანსფორმატორის ზეთის ν/ρ და $tg\delta$ შორის კავშირის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება. ”ენერჯია”, 2013, N1(65), გვ. 38-41.
41. ჩიხლაძე რ., გურასპაშვილი გ. ტრანსფორმატორის ზეთის ν/ρ და $tg\delta$ შორის კავშირის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება. II საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის - ”ენერჯეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები - მოხსენებების კრებული. 25-26 მაისი 2013, ქუთაისი. გვ. 35-39.