

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი გურასპაშვილი

ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთების  
პარამეტრებს შორის ურთიერთკავშირი

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორ ე ფ ე რ ა ტ ი

სადოქტორო პროგრამა: "ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია"

შიფრი: 0405

თბილისი

2019

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი  
ელექტროენერგეტიკისა და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი რ. ჩიხლაძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2019 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და  
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო კოლეგიის სხდომაზე,  
კორპუსი VIII, აუდიტორია 805  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

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

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,  
ასოცირებული პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

აქტუალურია თემა იმდენად, რამდენადაც ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლების ლაბორატორიულ პირობებში განსაზღვრისას აუცილებელი ხდება ზოგიერთი პარამეტრის გაზომვის სიზუსტის შემოწმება სხვა პარამეტრის საშუალებით. ან ერთი პარამეტრით მეორე პარამეტრის განსაზღვრა. ამისათვის აუცილებელია ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთის პარამეტრებს შორის კავშირის ექსპერიმენტალური დადგენა, რადგან ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთების იმდენად დაძველებულია, რომ ახალი ზეთის პარამეტრებს შორის არსებული კავშირი დასახული მიზნისთვის სრულიად გამოუსადეგარია.

**მეცნიერულ სიახლეს ნაშრომში წარმოადგენს:** პირველად ექსპერიმენტალურად დამყარდა კავშირი ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთების ელექტრულ და არაელექტრულ პარამეტრებს შორის, კერძოდ :

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

**სამუშაოს მიზანი.** ექსპერიმენტალურად გამოვავლინოთ ტრანსფორმატორის ზეთის ორ ან რამოდენიმე პარამეტრს შორის კავშირი, როგორც ახალი ისევე საექსპლუატაციო ზეთებისათვის და ამ კანონზომიერებით მოვახდინოთ ზეთის პარამეტრების განსაზღვრის სისწორის შემოწმება ან აუცილებლობის შემთხვევაში მოვახდინოთ ამ

კანონზომიერებით მეორე პარამეტრის დადგენა ისე რომ ეს უკანასკნელი არ გავზომოთ.

**კვლევის ობიექტი.** კვლევის ობიექტს წარმოადგენდა ახალი და ექსპლუატაციაში მყოფი ტრანსფორმატორის ზეთები, როგორც ევროპული ასევე რუსული წარმოების.

**კვლევის მეთოდი.** ლაბორატორიის პირობებში ცდის საშუალებით განისაზღვრებოდა ტრანსფორმატორის ზეთების სხვადასხვა მახასიათებლები წინასწარ შერჩეული ზეთებისთვის და მიღებული შედეგების გაანალიზებით მათ შორის კანონზომიერების გამოვლენა.

**კვლევების შედეგები და გამოყენების სფერო.** მიღებული შედეგები შესაძლებელია გამოყენებული იყოს ზეთის ლაბორატორიული კვლევისას, როდესაც პარამეტრების ურთიერთ შემოწმება აუცილებელი ან პარამეტრის მნიშვნელობის გამოთვლაა საჭირო, მაგრამ ერთ-ერთი მათგანის ცდით საშუალებით განსაზღვრა შეუძლებელია.

#### **დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა.**

სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს 110 გვერდს. იგი შედგება შესავლის, ორი თავისა და დასკვნითი ნაწილისაგან. გამოყენებული ლიტერატურის სია წარმოდგენილია 41 დასახელებით.

#### **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.

## ნაშრომის მოკლე შინაარსი

ძალოვანი ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის ერთ-ერთ კომპონენტს ტრანსფორმატორის ზეთი წარმოადგენს, რომელიც ნავთობის ფრაქციული გამოხდის 350-დან 400 °C შედეგად მიიღება.

ექსპლუატაციის განმავლობაში სხვადასხვა ფაქტორების გავლენით ზეთის მახასიათებლები იცვლება და გარკვეული დროის გავლის შემდეგ იგი აღარ აკმაყოფილებს საექსპლუატაციო მოთხოვნებს, ე.ი. ზეთი ექსპლუატაციისთვის უვარგისია.

სატრანსფორმატორო ზეთის ხარისხის დასადგენად დაახლოებით 24 მახასიათებელი სიდიდის გაზომვა ხდება. თითოეული პარამეტრის განსაზღვრისთვის შესაბამისი ანალიზი სტანდარტის მოთხოვნების გათვალისწინებით ტარდება. მიღებულ შედეგებს შეადარებენ ნორმატიულ დოკუმენტების მონაცემებს და საზღვრავენ სატრანსფორმატორო ზეთის ხარისხს.

ტრანსფორმატორის ზეთის ხარისხის კონტროლისათვის შემოკლებული ან სრული ანალიზი ტარდება. შემოკლებული ანალიზი 6 პარამეტრის განსაზღვრას მოიცავს, ხოლო სრული -24 პარამეტრისას. ისმება კითხვა როგორაა ეს მახასიათებლები ერთმანეთზე დამოკიდებული? რა ცვლილებას იწვევს ერთი მათგანის გაუმჯობესება ან გაუარესება? შეიძლება თუ არა რამოდენიმე მახასიათებლის განსაზღვრით ვიმსჯელოთ დანარჩენებზე? ან ზეთის ვარგისიანობაზე?

სწორედ ამ კითხვებზე პასუხის გაცემის ცდაა მიმდინარე სამუშაო. ძალზედ მნიშვნელოვანია არსებობდეს მეთოდი, რომლის საშუალებითაც ორ ან მეტ მახასიათებელს დავუკავშირებთ ერთმანეთს და ერთი მახასიათებლის განსაზღვრით ვიმსჯელებთ მეორეზე, ანდა თუკი მოხერხდება ორი პარამეტრის ერთმანეთთან დაკავშირება, შეიძლება ეს გამოვიყენოთ, როგორც პარამეტრების ურთიერთგადამოწმების საშუალება,

ან ამ პარამეტრების ურთიერთდამოკიდებულების საშუალებით ვიმსჯელოთ სატრანსფორმატორო ზეთის სხვა მახასიათებლებზე.

რათქმაუნდა მნიშვნელოვანია, როდესაც ერთმანეთს უკავშირდება სატრანსფორმატორო ზეთის ელექტრული და არაელექტრული პარამეტრები, მაგრამ გასათვალისწინებელია ისიც, რომ ასეთი კავშირის დადგენა დიდ სირთულესთანაა დაკავშირებული.

ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს დავამყაროთ ურთიერთკავშირი:

1. ტრანსფორმატორის ზეთის კუთრ წინაღობასა ( $\rho$ ) და კინემატიკურ სიბლანტეს შორის ( $\nu$ ), რომლის თეორიული წანამდვრებები არსებობს, მაგრამ ის განსაზღვრულია მხოლოდ იდეალურად სუთა ზეთებისათვის და არ არის შესწავლილი საექსპლუატაციო ზეთებისათვის.

გასათვალისწინებელია ტემპერატურის, სისუფთავის, აირშემცველობის, ტენშემცველობის გავლენა აღნიშნულ დამოკიდებულებაზე.

2. ტრანსფორმატორის ზეთის გარდატეხვის მაჩვენებლისა და სიმკვრივის შორის კავშირი ახალი და საექსპლუატაციო ზეთებისათვის;

3. ტრანსფორმატორის ზეთის მჟავური რიცხვისა და ზედაპირული დაჭიმულობის შორის ურთიერთკავშირი.

ლიტერატურაში ძალიან მცირეა ინფორმაცია აღნიშნული კავშირის თეორიული შეფასების, როგორებიცაა იდეალურად გასუფთავებული ასევე ექსპლუატაციისთვის მომზადებული ახალი ზეთებისთვის, ხოლო ექსპლუატაციაში მყოფი ან ექსპლუატაციისთვის უვარგისი, მაგრამ რეგენირებული ზეთებისთვის ზემოთჩამოთვლილი კავშირის არც თეორიული შეფასების და არც ექსპერიმენტალულარად დადასტურების ინფორმაცია ლიტერატურაში არ არსებობს.

ამის გამო ზემოთჩამოთვლილი კავშირების ექსპერიმენტალურად დადგენის ან თეორიულად შეფასების მცდელობა რათქმაუნდა მეცნიერულ სიახლეს წარმოადგენს და სასარგებლო იქნება როგორც მეცნიერული თვალსაზრისით ასევე პრაქტიკული გამოყენებისათვის.

**სიბლანტე.** სითხის სიბლანტე ( $\nu$ ) ანუ შიგა ხახუნის 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 (I) ფორმულისა სიბლანტის დამოკიდებულებას ტემპერატურაზე შემდეგი სახე აქვს :

$$\nu_1 = \nu_0 e^{-\beta(t-t_0)} \quad (1)$$

ამ გამოსახულებაში ( $\nu_1$ ) და ( $\nu_0$ )- სითხის სიბლანტეებია  $t$  და  $t_0$  ტემპერატურებზე, ხოლო  $\beta$  სიბლანტის ტემპერატურული კოეფიციენტი და გვიჩვენებს თუ რამდენჯერ მცირდება სიბლანტე ტემპერატურის  $1^\circ\text{C}$  -ით გაზრდისას.

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 ზემოქმედებებისას.

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

$$V = \frac{F}{6\pi r \nu} \quad (2)$$

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

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

$$F = qE \quad (3)$$

ცნობილია, რომ სითხის ელექტრო გამტარებლობა ზოგადად შემდეგი ფორმულით გამოისახება:

$$\gamma = \frac{n \cdot q \cdot v}{E} \quad (4)$$

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

თუ (IV) გამოსახულებაში შევიტანთ (III) და (II) მაშინ მივიღებთ რომ:

$$\gamma = \frac{n \cdot q^2}{6\pi r v} \quad (5)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ:

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

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.

მიზნად დავისახეთ შეგვემოწმებინა აღნიშნული კანონზომიერება ახალი და ექსპლუატაციაში მყოფი სატრანსფორმატორო ზეთებისათვის და დაგვედგინა ამ ნამრავლის სიდიდე სხვადასხვა ტემპერატურაზე ექსპლუატაციისთვის უვარგისი ზეთებისათვის და საექსპლუატაციოდ უვარგისი და შემდგომ ასკანთიხით რეგენერირებული ზეთებისთვის, რომლებიც აკმაყოფილებდა საექსპლუატაციოდ მომზადებული ზეთის მოთხოვნებს.

ლაბორატორიული ცდის ჩასატარებლად ავიღე სხვადასხვა მარკის ზეთები, როგორებიცაა BF, TCO, T-1500 და ასევე 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  $v/\rho$  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  $\nu/\rho$  ტემპერატურის 20 და 50 °C-ის ინტერვალში მუდმივი სიდიდე არ არის და ტემპერატურის გაზრდით ის მიახლოვებით 1.8 ჯერ იცვლება.

**ცხრილი 1. ახალი BF მარკის ზეთის სიბლანტე და კუთრი წინააღმდეგობა 20 და 50 °C ტემპერატურებზე**

Nº	$U_{20}$	$\rho_{20}$	$U_{20}/\rho_{20}$	$U_{50}$	$\rho_{50}$	$U_{50}/\rho_{50}$	$\frac{U_{20}}{\rho_{20}} / \frac{U_{50}}{\rho_{50}}$
1	26.4	$9.5 \times 10^{12}$	$2.77 \times 10^{-12}$	8.8	$5.6 \times 10^{12}$	$1.57 \times 10^{-12}$	1.76
2	25.3	$16 \times 10^{12}$	$1.56 \times 10^{-12}$	8.5	$9.3 \times 10^{12}$	$0.91 \times 10^{-12}$	1.71
3	22.2	$1.4 \times 10^{12}$	$15.8 \times 10^{-12}$	8.1	$8.2 \times 10^{12}$	$8.2 \times 10^{-12}$	1.97
4	24.5	$2.1 \times 10^{12}$	$7 \times 10^{-12}$	7.2	$9.5 \times 10^{12}$	$0.17 \times 10^{-12}$	1.76
5	22.2	$2 \times 10^{12}$	$11.3 \times 10^{-12}$	7.4	$9.5 \times 10^{12}$	$6.3 \times 10^{-12}$	1.75
6	22.3	$1.7 \times 10^{12}$	$13.1 \times 10^{-12}$	7.5	$9.5 \times 10^{12}$	$7.6 \times 10^{-12}$	1.72
7	20.0	$2.2 \times 10^{12}$	$9 \times 10^{-12}$	7.3	$9.5 \times 10^{12}$	$5.2 \times 10^{-12}$	1.72

ევროპული წარმოების TECHNOL Y-3 მარკის ზეთი ორი სხვადასხვა პარტია იყო, მაგრამ მათ მახასიათებლებს შორის განსხვავება შეინიშნებოდა

ორივე პარტიის ზეთისთვის  $\nu/\rho$  ნებისმიერი ტემპერატურისთვის უფრო ნაკლებია ვიდრე T-1500 მარკის ზეთებისთვის, რაც ამ ზეთის მაღალ ხარისხზე მიუთითებს და ეს შეფარდება ტემპერატურის გაზრდით თითქმის არ იცვლება.

**ცხრილი 2. ახალი T-1500 ზეთის სიბლანტე და კუთრი წინააღმდეგობა 20 და 50 °C ტემპერატურაზე**

#	$U_{20}$	$\rho_{20}$	$U_{20}/\rho_{20}$	$U_{50}$	$\rho_{50}$	$U_{50}/\rho_{50}$	$\frac{U_{20}/\rho_{20}}{U_{50}/\rho_{50}}$	$U_{20}/\rho_{50}$
1	20.2	$0.35 \times 10^{12}$	$57 \times 10^{-12}$	7.2	$0.21 \times 10^{12}$	$34 \times 10^{-12}$	1.67	2.8
2	19.1	$0.12 \times 10^{12}$	$165 \times 10^{-12}$	7.0	$0.07 \times 10^{12}$	$100 \times 10^{-12}$	1.65	2.84

**ცხრილი 3. ახალი TCO ზეთის სიბლანტე და კუთრი წინააღმდეგობა 20 და 50 °C ტემპერატურაზე**

#	$U_{20}$	$\rho_{20}$	$U_{20}/\rho_{20}$	$U_{50}$	$\rho_{50}$	$U_{50}/\rho_{50}$	$\frac{U_{20}/\rho_{20}}{U_{50}/\rho_{50}}$	$U_{20}/\rho_{50}$
1	16.1	$0.19 \times 10^{12}$	$8.47 \times 10^{-12}$	5.9	$0.1 \times 10^{12}$	$5.9 \times 10^{-12}$	1.43	2.7
2	22.2	$2.3 \times 10^{12}$	$9.6 \times 10^{-12}$	8.1	$0.94 \times 10^{12}$	$8.6 \times 10^{-12}$	1.11	2.74
3	20	$2.5 \times 10^{12}$	$8.1 \times 10^{-12}$	6.8	$1.49 \times 10^{12}$	$4.65 \times 10^{-12}$	1.75	2.94
4	19.6	$2.5 \times 10^{12}$	$7.84 \times 10^{-12}$	6.6	$1.5 \times 10^{12}$	$4.4 \times 10^{-12}$	1.78	2.96
5	20	$2.6 \times 10^{12}$	$7.7 \times 10^{-12}$	6.6	$1.55 \times 10^{12}$	$4.38 \times 10^{-12}$	1.78	3
6	19.5	$2.6 \times 10^{12}$	$7.5 \times 10^{-12}$	6.6	$1.58 \times 10^{12}$	$4.1 \times 10^{-12}$	1.8	2.95

ამის შემდეგ გამოვიყენე AES „თელასი“ ის ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთების მონაცემები. ამ ზეთების უმეტესობა აკმაყოფილებდა საექსპლუატაციო მოთხოვნებს. ის კანონზომიერებები, რომელიც ახალი ზეთებისთვის გამოვლინდა დადასტურდა ექსპლუატაციაში მყოფი ნამუშევარი ზეთებისთვის.

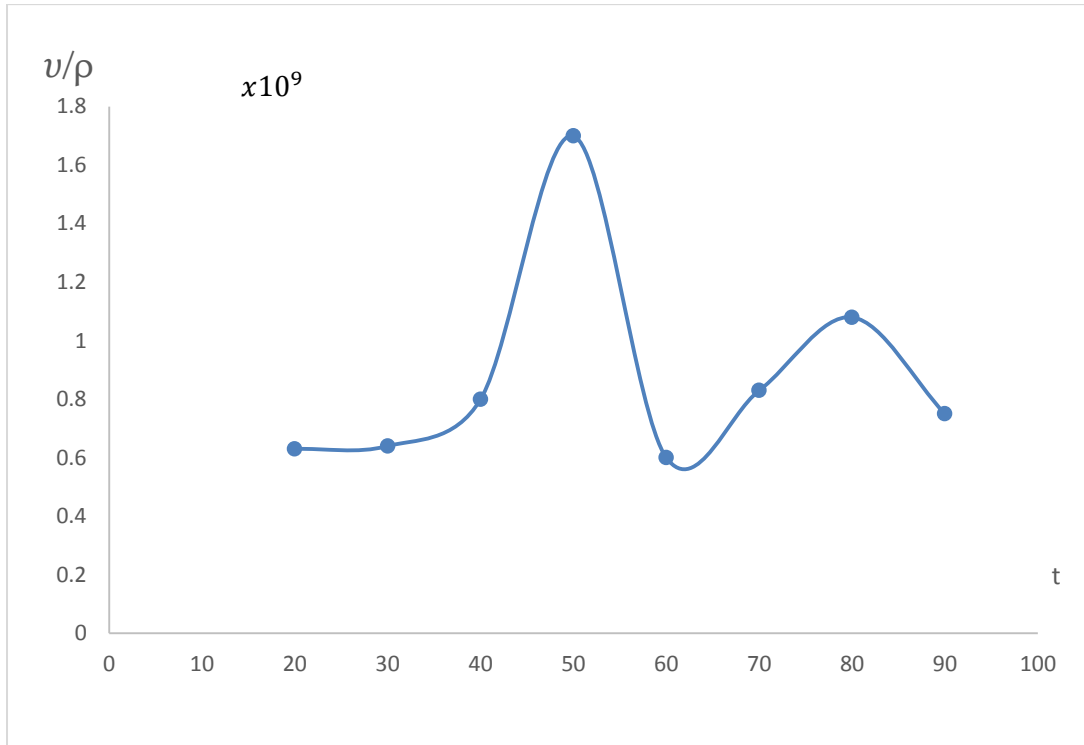
ტრანსფორმატორის ზეთის  $\nu/\rho$  დამოკიდებულების შესწავლის მიზნით 20 და 90 °C ტემპერატურის ინტერვალში ჩვენს მიერ გამოყენებული იყო ქვესადგურ „ნავთლული -220“ ის - ტპ ტრანსფორმატორიდან აღებული

ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთი, რომელიც არ აკმაყოფილებდა საექსპლუატაციო მოთხოვნებს. ამ მონაცემების მქონე ზეთებისთვის დამუშავების გარეშე განვსაზღვრეთ ( $\rho$ ) და ( $\nu$ )- ს მნიშვნელობები აღნიშნულ ინტერვალში და შესაბამის ტემპერატურაზე ვიანგარიშეთ  $\nu/\rho$  - სიდიდე. რომლის მონაცემებითაც ავაგეთ  $\nu/\rho$  დამოკიდებულების გრაფიკი ტემპერატურაზე.

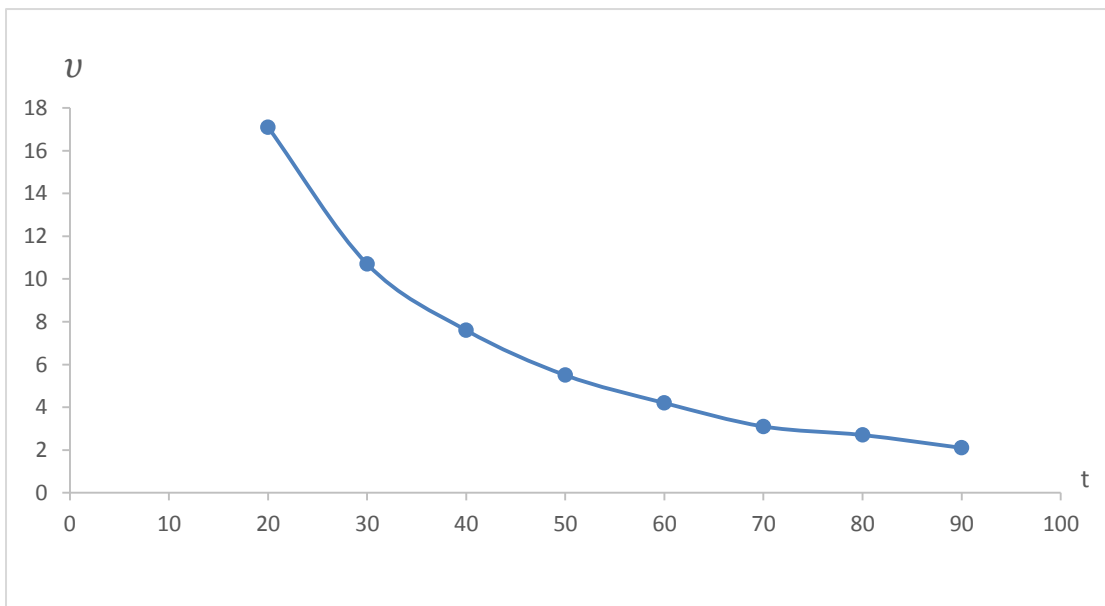
საიდანაც ჩანს, რომ საწყის ეტაპზე 40 °C -მდე ტემპერატურის გაზრდით  $\nu/\rho$  უმნიშვნელოდ იზრდება აღწევს მაქსიმუმს, შემდეგ მცირდება და ბოლოს ისევ იზრდება, აღნიშნული ცვლილება სავარაუდოდ განპირობებულია  $t=50^{\circ}\text{C}$  -ის ინტერვალში ბმული წყლის გახსნილ წყალში გადასვლით, რაც მკვეთრად ამცირებს კუთრ წინაღობას, ხოლო  $t=90^{\circ}\text{C}$  -ის მახლობლობაში ადგილი აქვს თავისუფალი წყლის აორთქლების დაწყებას, რის გამოც წინააღმდეგობა უნიშვნელოდ იზრდება, ხოლო  $\nu$ -ს დამოკიდებულება  $t$ -ზე თითქმის ექსპონენციალურ სახეს ატარებს.

**ცხრილი 4. ქვესადგური „ნავთლული -220“ ტ 3 ტრანსფორმატორის ზეთის  $\nu$ .  $\rho$  და  $\nu/\rho$  -ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე**

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



ნახაზი 1. ქვესადგური „ნავთლული -220“ ის ტრანსფორმატორი 3 ის  $v/\rho$  ის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდი



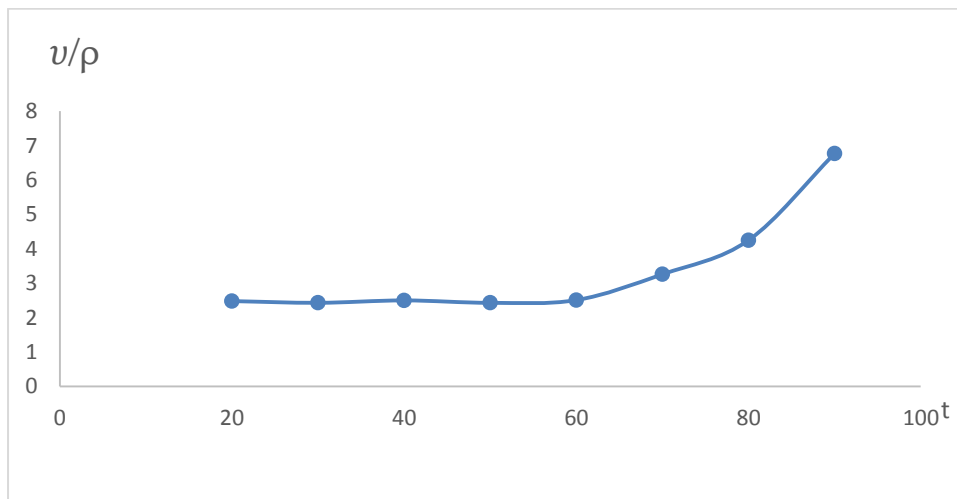
ნახაზი 2. ქვესადგური „ნავთლული -220“ ის ტრანსფორმატორი 3 ის  $v$  ის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდი

ამ ფაქტორების გამორიცხვის მიზნით ჩვენ აღნიშნულ ზეთს ჩავუტარეთ გაფილტვრა თავისუფალი გადინების მეთოდით, რის შედეგადაც მექანიკური მინარევების კლასი შეესაბამებოდა სტანდარტის X კლასს და

საგრძობლად შემცირდა თითქმის ყველა ზომის ნაწილაკების რიცხვი, მაგრამ ამ გაფილტვრის შედეგად მაინც არ შემცირდა ტენშემცველობა ასეთი ზეთისთვის განვსაზღვრეთ სხვადასხვა ტემპერატურაზე  $\nu$ ,  $\rho$  და  $\nu/\rho$ -ს შეფარდება საიდანაც ჩანს რომ წინააღმდეგობა  $\rho$  თითქმის 20-40 ჯერ გაიზარდა, ხოლო სიბლანტე თითქმის არ შეცვლილა.

**ცხრილი 5. ტრანსფორმატორის ზეთის გამრღვევ ძაბვასა და ვარიაციის კოეფიციენტის დამოკიდებულება**

N	$t/20$	$\rho$ ომი.მ	$\nu$ ს.სტ	$\nu/\rho$
1	20	$7.6 \times 10^{10}$	18.9	$2.48 \times 10^{-10}$
2	30	$4.4 \times 10^{10}$	10.7	$2.43 \times 10^{-10}$
3	40	$3 \times 10^{10}$	7.6	$2.5 \times 10^{-10}$
4	50	$2.26 \times 10^{10}$	5.5	$2.43 \times 10^{-10}$
5	60	$1.57 \times 10^{10}$	4.0	$2.51 \times 10^{-10}$
6	70	$0.98 \times 10^{10}$	3.2	$3.26 \times 10^{-10}$
7	80	$0.58 \times 10^{10}$	2.5	$4.25 \times 10^{-10}$
8	90	$0.31 \times 10^{10}$	2.1	$6.77 \times 10^{-10}$



**ნახაზი 3. ქვესადგური „ნავთლული -220“ ის ტრანსფორმატორი 3-ის  $\nu/\rho$  ის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდი (გაფილტვრისა და ვაკუუმირების შემდეგ)**

ტენის გამორიცხვის მიზნით ჩვენ მოვახდინეთ გაფილტრული ზეთის ვაკუუმის ქვეშ  $P=50$  მმ.ვწ.სვ დამუშავება 10 წუთის განმავლობაში, რამაც

ტენზემცველობა 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  $\nu/\rho$ -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  $\nu/\rho$ -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  $\nu$  -ს შემცირება. ეს კი ადასტურებს მოსაზრებას, რომ ტემპერატურის გაზრდით ადგილი აქვს დენის მატარებელი ნაწილაკების რიცხვის გაზრდას, რაც სავარაუდოდ მინარევების დისოციითაა გამოწვეული.

შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ახალი და ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისთვის, რომლებიც საექსპლუატაციო მოთხოვნებს აკმაყოფილებენ  $\nu/\rho$  ტემპერატურის 20 დან 50°C -ის ინტერვალში მუდმივი სიდიდე არ არის და ტემპერატურის გაზრდით მიახლოებით 1.8 ჯერ იზრდება.

### **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:

$$\varepsilon_t \approx (n_t)^2 \quad (7)$$

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

$$\varepsilon - n^2 = (V_k) \quad (8)$$

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  $V_k$ . ვერმანის კოეფიციენტის გაზრდა მიუთითებს, რომ ზეთში გაიზარდა ბმული წყლის ან დაძველების დიპოლური პროდუქტების რაოდენობა. ამ მოვლენების შესაფასებლად აუცილებელია დიდი სიზუსტით განისაზღვროს დიელექტიკული შეღწევადობის  $\varepsilon$  და გარდატეხის მაჩვენებლის  $n$  მნიშვნელობები. ამასთანავე უნდა გავითვალისწინოთ ისიც, რომ  $\varepsilon$  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.

**ცხრილი 6. ახალი ზეთები**

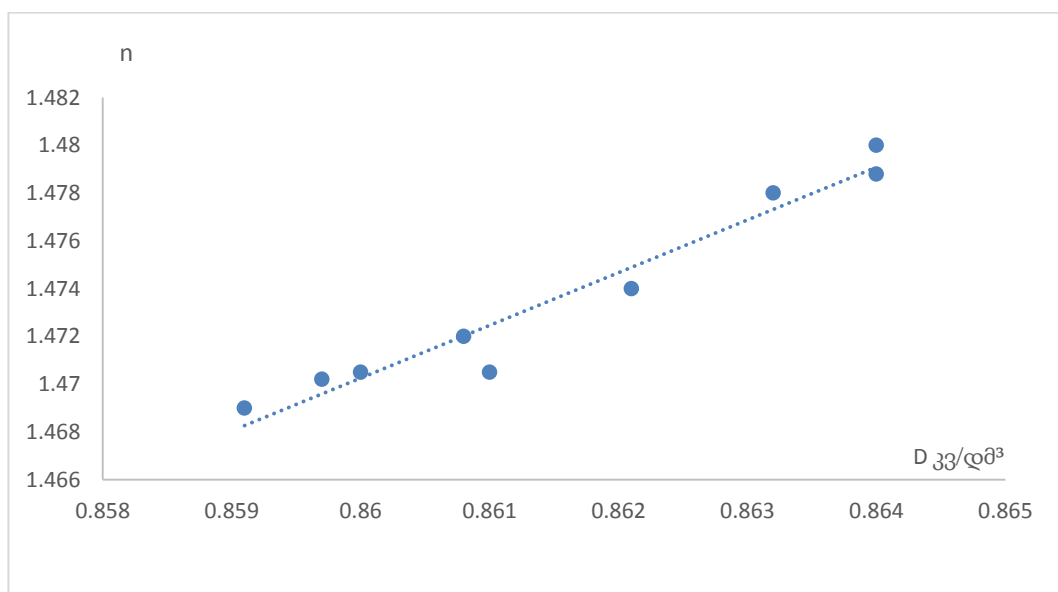
N	გარდატეხის მაჩვენებელი	სიმკვრივე	n-D
	n	D	
1	1.4700	0.8510	0.619
2	1.4702	0.8597	0.611
3	1.4705	0.8610	0.610
4	1.4705	0.8600	0.611
5	1.4727	0.8583	0.614
6	1.4728	0.8581	0.615
7	1.4730	0.8586	0.614
8	1.4733	0.8544	0.619
9	1.4740	0.8591	0.615
10	1.4748	0.8621	0.613
11	1.4749	0.8608	0.614
12	1.4751	0.8602	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



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

გრაფიკზე მოყვანილია ახალი ზეთებისთვის გარდატეხის მაჩვენებლისა და  $n$  ს და სიმკვრივის 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  $\pm 0.0001$ ), 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 4.  $n = f(D)$ -ახალი ზეთებისთვის

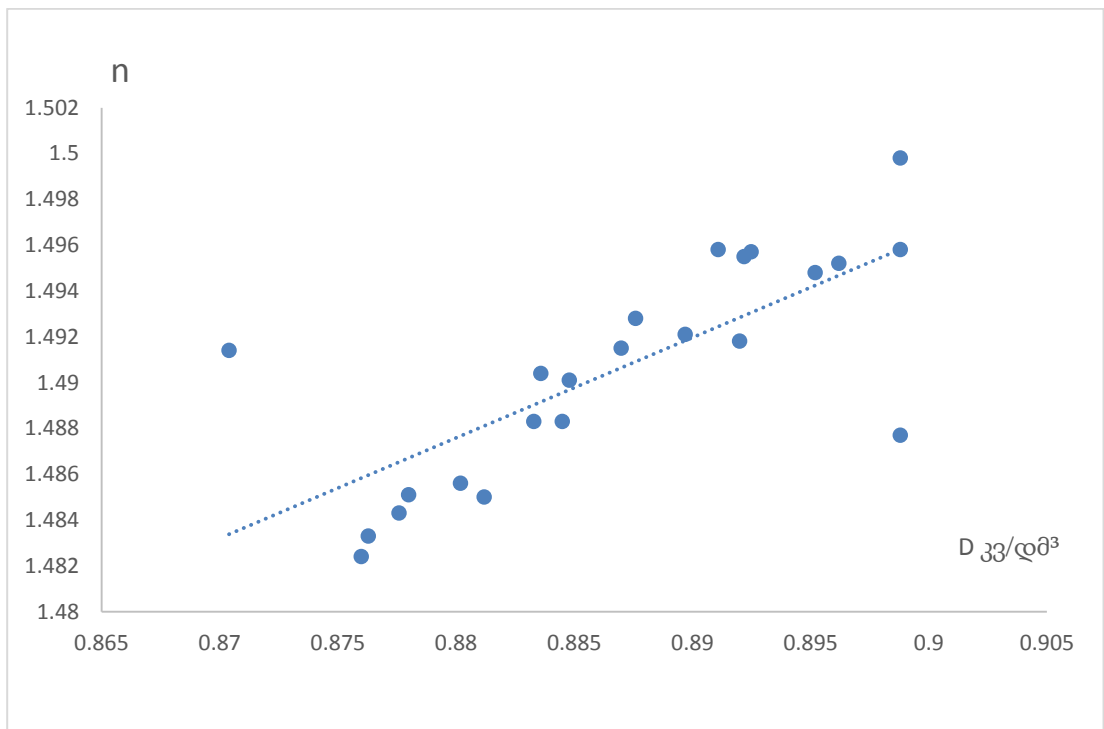
**ცხრილი 7. ძველი ნამუშევარი ზეთები**

N	გარდატეხის მაჩვენებელი	სიმკვრივე	n-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

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.



**ნახაზი 5.  $n = f(D)$ -ბეელი 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.

საბოლოოდ შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ექსპერიმენტალური მონაცემების დამუშავების საფუძველზე  $n$  – ს და  $D$  – ს სიდიდე ახალი ზეთებისათვის

მოთავსებულია  $0.610 \pm 0.619$  -ის დიაპაზონში, ხოლო ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისათვის კი  $0.597 \pm 0.611$  დიაპაზონში.

### **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 ( $tgd$ ), მაგრამ მათ შორის პირდაპირი კავშირი ექსპერიმენტალური მონაცემებით ძნელი დასადგენია, რადგან ერთდროულად 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 ( $\sigma$ ) 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.

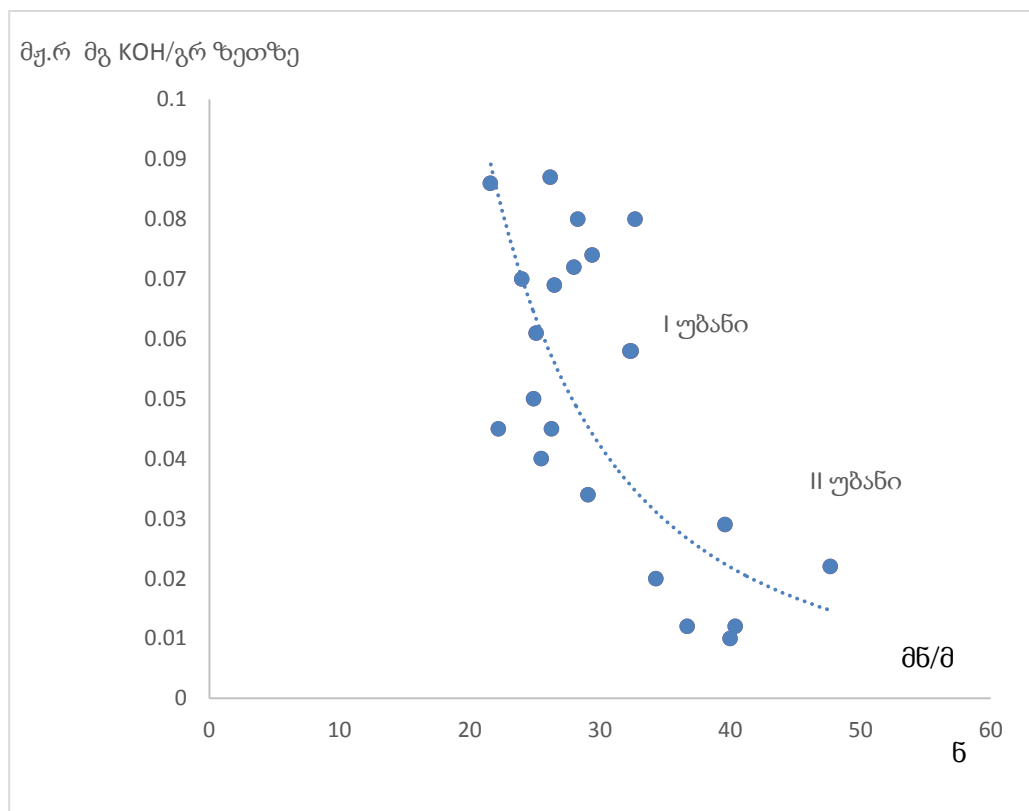
**ცხრილი 8. ტრ-ის ზეთის ზედაპირულ დაჭიმულობასა და მჟავურ რიცხვს შორის კავშირი.**

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

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 (წარმოშობა) გამოწვეული. გასათვალისწინებელია, რომ

ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთები სხვადასხვა მარკის ზეთების წარმომადგენს, 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 6. მუავური 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.

ზემოთთქმულიდან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ 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. თუ ადგილი აქვს გადახრას ამ ზოგადი კანონზომიერებიდან, მაშინ საჭიროდ მიგვაჩნია ცდის განმეორება ან ზეთის სხვა პარამეტრების დაზუსტება.

## დასკვნა

1. ახალი და ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისათვის, რომლებიც საექსპლუატაციო მოთხოვნებს აკმაყოფილებენ  $v/p$  ტემპერატურის  $20 \pm 50$  °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  $0.610 \pm 0.619$ -ის, ხოლო ექსპლუატაციაში მყოფი ზეთებისათვის კი  $0.597 \pm 0.611$  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.

## დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია შემდეგი შრომები:

1. ჩიხლაძე რ., გურასპაშვილი გ., ჩიხლაძე ქ. ტრანსფორმატორის ზეთის ხარისხის შეფასება *ს/რ* სიდიდით. სტუ-ის შრომები, 2012, N4, გვ. 9-12.
2. ჩიხლაძე რ., გურასპაშვილი გ., ჩიხლაძე ქ. ტრანსფორმატორის ზეთის რეფრაქციის კოეფიციენტისა და სიმკვრივეს შორის კავშირი. სტუ-ის შრომები, 2012, N4, გვ. 13-15.
3. გურასპაშვილი გ. ტრანსფორმატორის ზეთის *ს/რ* და *ტგბ* შორის კავშირის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება. "ენერჯია", 2013, N1(65), გვ. 38-41.
4. ჩიხლაძე რ., გურასპაშვილი გ. ტრანსფორმატორის ზეთის *ს/რ* და *ტგბ* შორის კავშირის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება. II საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის - "ენერჯეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები - მოხსენებების კრებული. 25-26 მაისი 2013, ქუთაისი. გვ. 35-39.

## 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.  $\nu/\rho$  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  $\nu/\rho$  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  $\nu/\rho$  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  $\nu/\rho$  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 ( $\rho$ ) and ( $\nu$ ) values without treatment. We calculated the  $\nu/\rho$  size, which data was used to draw  $\nu/\rho$  ratio diagram at temperature, which shows that at initial stage  $\nu/\rho$  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=90deg free water starts evaporating, because of that resistance significantly increases and ( $\nu$ ) 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 ( $\rho$ ) and ( $\nu$ ) values on different temperatures and calculated  $\nu/\rho$  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  $\nu/\rho$  ratio is more less Stabil up to 70 deg. In order to determine how temperature difference changes in diapason  $\nu/\rho$  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.