

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ლაშა თევდორაშვილი

მაღალი ძაბვის მოწყობილობების თბოვიზორული დიაგნოსტიკა

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია, შიფრი 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2015 წელი

საავტორო უფლება © 2015 წელი, ლაშა თევდორაშვილი

თბილისი
2015 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავცანით ლაშა თევდორაშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „მაღალი ძაბვის მოწყობილობების თბოვიზორული დიაგნოსტიკა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: ასოც პროფესორი რამინ ჩიხლაძე
რეცენზენტი: პროფესორი თენგიზ მუსელიანი
რეცენზენტი: აკად. დოქტორი ვახტანგ გიორგობიანი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2015 წელი

ავტორი: ლაშა თევდორაშვილი

დასახელება: მაღალი ძაბვის მოწყობილობების თბოვიზორული
დიაგნოსტიკა

ფაკულტეტი : ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

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
ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ
მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია
სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს
პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

ღაშა თევდორაშვილის დისერტაცია „მაღალი ძაბვის მოწყობილობების თბოვიზორული დიაგნოსტიკა“ ეხება ენერგეტიკის აქტუალურ პრობლემას, კერძოდ, მაღალი ძაბვის მოწყობილობების თბოვიზორულ დიაგნოსტიკას. ეს მეთოდი დღეისათვის ყველაზე პერსპექტიულია და ფართოდ გამოიყენება მეცნიერებისა და ტექნიკის ყველა სფეროში, მათ შორის, ენერგეტიკაში.

აღნიშნული მეთოდით ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში, უწყვეტი ექსპლუატაციის პირობებში, ისეთი ელექტრული დეფექტების აღმოჩენაა შესაძლებელი, რომლებიც ელექტრული გაზომვებითაც გამოვლინდება, ამასთან ერთად, თბოვიზორული დიაგნოსტიკა საშუალებას გვაძლევს აღმოვანიხთ ისეთი დეფექტებიც, რომელთა გამოვლენა ელექტრული გაზომვებით შეუძლებელია. მაგალითად, გამცივებელი რადიატორების სითბოგაცემის დეფექტები.

ნაშრომი შედგება 120 გვერდისაგან და დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი დისერტაციის გაფორმების ინსტრუქციის მიხედვით მოიცავს: ტიტულის გვერდს, ხელმოწერების გვერდს, საავტორო უფლებების გვერდს, რეზიუმეს ორ ენაზე (ქართულ-ინგლისური), შინაარსს (სარჩევს), ცხრილების და ნახაზების ნუსხას. ძირითადი ტექსტი შედგება ლიტერატურის მიმოხილვის, ოთხი თავის, დასკვნის და გამოყენებული ლიტერატურის სიისაგან.

პირველ თავში განხილულია სხეულის გამოსხივების სპექტრი ინფრაწითელი და ხილული სხივების წარმოქმნის და გავრცელების კანონები. ნაჩვენებია ინფრაწითელი სხივების კავშირი სხეულის ტემპერატურასთან. აღწერილია ინფრაწითელი სხივების სპექტრალური შემადგენლობა, მისი გავრცელება გარემოში, ინფრაწითელი სხივების შთანთქმა წყლის ორთქლის, ოზონის და ჰაერში მყოფი ნახშირორჟანგის მიერ, აგრეთვე, მისი გაბნევა ატმოსფეროში მყოფი მტვრის მცირე ზომის ნაწილაკების მიერ. აღწერილია ინფრაწითელი სხივების მიმღები და გარდამსახი მოწყობილობები, კერძოდ, თერმისტორები და ბოლომეტრები, მათი კონსტრუქციული თავისებურებები. განხილულია ძირითადი მახასიათებლები, როგორცაა: მგრძობიარობა, რაც ტემპერატურის ერთი გრადუსით გაზრდისას წინაღობის ცვლილებაში გამოიხატება. აღწერილია წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე და ამ დამოკიდებულების ტემპერატურული კოეფიციენტი.

პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით განხილულია თერმისტორის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პარამეტრი - დროის მუდმივა, ეს ის დროა, რომელიც საჭიროა ტემპერატურის 100 °C-ით ცვლილებისას შესაბამის ტემპერატურის ანუ ელექტრული სიგნალის დასამყარებლად ბოლომერის გამოსასვლელზე. აქვე განხილულია ამ ტემპერატურის კავშირი თერმისტორის (ბოლომეტრის) მაქსიმალურ დასაშვებ ტემპერატურასთან. რა თქმა უნდა, განხილულია თერმისტორის მაქსიმალური დასაშვები სიმძლავრე და, შესაბამისად, მაქსიმალური მუშა ტემპერატურის სიდიდე.

მნიშვნელოვანი ყურადღება აქვს დათმობილი სხვადასხვა მასალებისგან დამზადებული თერმისტორების მგრძობიარობის შედარებას პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით.

ამავე თავში განხილულია ბოლომეტრის კონსტრუქცია და ტემპერატურის აღქმის სტაბილურობის მიღწევის მეთოდები. აღწერილია სხვადასხვა სახის ინფრაწითელი სხივის ხელსაწყოების მუშაობის პრინციპი და გამოყენება.

ფართოდ არის განხილული თბოვიზორული ხელსაწყოები, მათი მუშაობის პრინციპი და სქემა, გამოსახულების აგების მეთოდები და იმ ტიპის თბოვიზორები, რომლებიც ენერგეტიკაში გამოიყენებიან. აღწერილია ამ თბოვიზორის მახასიათებლები, უპირატესობები და ნაკლოვანი მხარეები.

მეორე თავში აღწერილია მაღალი ძაბვის მოწყობილობების ის ელექტრული დეფექტები, რომლებიც ელექტრული გაზომვებით გამოვლინდებიან. ამ გაზომვების, კერძოდ უქმი სვლის დანაკარგების, ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის განსაზღვრის, გრაგნილის და საკონტაქტო შეერთების წინააღობის გაზომვის და მოკლედ შერთვის წინააღობის გაზომვის სქემები და ხელსაწყოები. აგრეთვე ნაჩვენებია, რომ საიზოლაციო სისტემის დეფექტების, კერძოდ, წინააღობის შემცირების ან დიელექტრიკული დანაკარგების გაზრდა მხოლოდ ელექტრული გაზომვებით გამოვლინდება და თბოვიზორული გამოკვლევით მისი აღმოჩენა შეუძლებელია.

მესამე თავში განხილულია მაღალი ძაბვის მოწყობილობების სითბოგამომყოფი დეფექტები, როგორცაა სხვადასხვა სახის საკონტაქტო შეერთების გარდამავალი წინააღობის გაზრდა, რაც დატვირთვის დენის მოქმედებით კონტაქტის გადახურებას და, შესაბამისად, ტემპერატურის გაზრდას იწვევს. ასევე აქტიურ ნაწილში გამოყოფილი სითბოს განაწილება გრაგნილის სიმაღლეზე, სითბოს გავრცელება და განაწილების ცვლილება მაგნიტოგამტარიდან ტრანსფორმატორის ავზის ზედაპირამდე. ასევე აღწერილია სითბოგამტარობით სითბური ნაკადის გავრცელება და ავზის ზედაპირიდან სითბოს გარემოზე გადაცემა.

ნაჩვენებია სითბურ დეფექტში („ცხელი წერტილი“) გამოყოფილი სითბოს გავრცელება ელექტროტექნიკურ მოწყობილობაში და ზეთის ბუნებრივ ან იძულებითი კონვექციის გავლენა ელექტროტექნიკურ მოწყობილობაში სითბოს განაწილებაზე.

ცალკე საკითხად არის განხილული ის დეფექტები, რომლებიც სითბოს არ გამოყოფენ, მაგრამ სითბოს გადაცემას ან გავრცელებას აფერხებენ. ასეთი დეფექტებია ტრანსფორმატორის ზეთის მოძრაობის შეფერხება გამცივებელ რადიატორში, თერმოსიფონურ ფილტრებში ან გამცივებელ მოწყობილობებში. აღწერილია ამ დეფექტების თვისებები და ზოგადი მახასიათებლები.

მეოთხე თავში აღწერილია და გაანალიზებულია ექსპერიმენტალური შედეგები. აქვე განხილულია თბური დეფექტების სითბური ნამატის ნორმები, ამ ნამატის მიხედვით შეფასებულია დეფექტის საშიშროების ხარისხი და მისი აღმოფხვრის ვადები.

რა თქმა უნდა, ყველა სახის დეფექტისთვის მოყვანილია ის მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურა, რომლის დროსაც დეფექტი საშიშროებას არ წარმოადგენს ან ძალიან მაღალია რისკი.

მნიშვნელოვანი ყურადღება აქვს დათმობილი თბოვიზორული გამოკვლევების პერიოდულობას და ჩატარების გარემო-პირობებს.

გაანალიზებულია სხვადასხვა დატვირთვის შემთხვევაში კონტაქტის გარდამავალი წინაღობის მატებით წარმოქმნილი თბური დეფექტის ტემპერატურის დამოკიდებულება დატვირთვის დენის სიდიდეზე.

აღწერილია ძალოვანი ტრანსფორმატორის გაცივების სისტემაში და თერმოსიფონურ ფილტრებში ზეთის მოძრაობის შედეგად წარმოქმნილი დეფექტები და გაანალიზებულია მათი წარმოქმნის მიზეზები.

მნიშვნელოვანი ყურადღება აქვს დათმობილი სხვადასხვა სახის მექანიკური შეერთების არასრულყოფილებით წარმოქმნილ დეფექტებს. აგრეთვე ექსპერიმენტულად შესწავლილია ამ სახის დეფექტის ტემპერატურის დამოკიდებულება დატვირთვის დენის სიდიდეზე. ნაჩვენებია პირდაპირი გაზომვით მიღებული ტემპერატურის სიდიდესა და გადასაანგარიშებელი ფორმულებით მიღებული ტემპერატურის მნიშვნელობას შორის სხვაობა.

დადგენილია მექანიკური შეერთების არასრულყოფილებით წარმოქმნილი თბური დეფექტის ტემპერატურის დამოკიდებულება ქარის სიჩქარეზე, რითაც გამოვლინდა ქარის გავლენა დეფექტის ტემპერატურაზე.

აღწერილია მაღალი ძაბვის შემყვანებში და კაბელებში წარმოქმნილი თბური დეფექტები და გაანალიზებულია ამ დეფექტების წარმოქმნის მიზეზები.

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

Abstract

Lasha Tevdorashvili's thesis "Thermal imager diagnostics of high-voltage devices" concerns actual problems of energetic, in particular the thermal imager of diagnostics of high-voltage devices. This method is the most perspective for today and is widely used in science and all spheres of technology, including energy sector. Specified method without operation interruption reveals such electronic defects in electro-technical devices which can be detected only by electronic measurements and together with it reveals such defects which can't be found by electronic measurements, for example, heat release defects of the cooling radiators.

The work consists from 120 pages and according to the instructions of registration of the presented thesis on competition of doctor's academic degree, contains: title page, subscription list, copyright page, summary in two languages (Georgian-English), contents (table of contents), tables and drawings list. The main text consists of literature review, four chapters, a conclusion and the list of the used literature.

Chapter 1 discusses spectrum of body radiations, laws of formation of infrared and visible rays, showing a relationship between infrared rays with body temperature. Also we have description of the spectral maintenance of infrared rays, their distribution in environment, and absorption of infrared rays by steam, ozone, air, and also its dispersion by small parts of atmospheric dust.

It discusses infrared ray receiver and converter devices, in particular thermistor and bolometer, their structural features. Also described their main characteristics such as sensitivity, that is expressed in change of stability when temperature one degree higher. It describes dependence of resistance on temperature and temperature coefficient of the specified resistance.

From the point of view of practical use one of important parameters of a thermistor is - constancy of time, it's time which is necessary for establishment of corresponding temperature or an electronic signal at the output of a bolometer during change of temperature on 100 degrees. It also discusses connection between this temperature with the most admissible temperature of a thermistor (bolometer). Of course, we consider the most admissible power of a thermistor and respectively, the maximum size of working temperature. Considerable attention is given to comparison of power sensitivity of the thermistors made of various materials from the point of view of the practical use.

In the same chapter structure of bolometer and temperature stability of perception methods are considered. Use and the principles of work of the infrared devices of various types also are described.

Widely are considered the thermal imager devices, principles of their work and scheme. methods of image structuring and those types of the thermal imager which are used in energetic. Features, advantages and disadvantages of such thermal imagers.

Chapter 2 describes those electronic defects of high voltage devices which are revealed by electronic measurements. of given measurement, in particular, idling losses, determination of transformation coefficient, scheme and device of measurement of windings and contact resistance measurement and resistance of

contact and short circuit. Besides, it is shown that defects in isolation system can be revealed only by electric measurements, in particular, reducing resistance or increasing dielectric losses, and it is impossible to find it by the thermal imager studying.

Chapter 3 discusses heat generation defects of the high-voltage devices, such as increase in transitional resistance of various types of contact connection which is in accordance with overheat of power contacts and increase in temperature. Also distribution of the allocated heat of a winding to its height, distribution of heat and distribution of change from the magnetically conductive transformer to a tank surface. Describing heat distribution of a thermal stream and transfer of heat from a tank surface to environment.

Showing distribution of heat allocated in thermal defect ('hot spots') in electro-technical devices and natural or compulsory influence of convection of oil on distributions of heat in the electro-technical equipment.

Those defects which don't radiate heat, but interfere with transfer or distribution of heat are considered separately. Such defects cause jam of transformer oil movement in the cooling radiator, in the thermosiphon filter or cooling device. Properties and a general characteristic of these defects are also described.

In chapter 4 experimental results are described and analysed. It deals with norms of increase in heat of thermal defects, according to mentioned increase the quality of defect danger and terms of its elimination are estimated.

Of course, for all types of defects is brought the most admissible temperature during which the defect doesn't constitute danger or the risk is very great.

The special attention is paid to frequency of thermal imager research and external conditions of their carrying out.

We analysed dependence, in case of different loadings, of thermal defects' temperature, caused by growth of transitional contact resistance on the current size.

The defects revealed as a result of the movement of oil in the cooling system and thermosiphon filters are described and the reasons of their emergence are analysed.

Special attention is paid to various types of defects formed as a result of defective mechanical connections. We also experimentally studied dependence of temperature of similar defects on the size of the load current. The difference between temperature size received by direct measurement and value of temperature, received by a settlement calculation is shown.

Dependence of temperature of the thermal defects received as a result of defective mechanical connection on wind speed helped to reveal influence of a wind on temperature of defects is established.

The thermal defects formed in input and high voltage cable and the reasons of appearance of defects are analysed.

On the basis of the analysis of the received results there had already been made the conclusions and recommendations, significant for science and having practical value.

შინაარსი

რეზიუმე -----	iv
Abstract -----	vii
შინაარსი-----	ix
ცხრილების ნუსხა-----	xi
ნახაზების ნუსხა-----	xii
შესავალი-----	xiv
ლიტერატურის მიმოხილვა-----	xvi
შედგენები და მათი განსჯა-----	xix
ექსპერიმენტალური მაწილი-----	xx
თავი 1.	
ამოცანის დასმა-----	23
1.1 ინფრაწითელი სხივები-----	23
1.2 ინფრაწითელი გამოსხივების თვისებები-----	26
1.3 ინფრაწითელი გამოსხივების მიმღები და გარდამსახი მოწყობილობები-----	29
1.4 ინფრაწითელი სხივების ხელსაწყოების გამოყენება-----	35
1.5 თბოვიზორული კამერები და მათი გამოყენება ენერგეტიკაში-----	37
1.6 თავი 1-ის მიმართ დასკვნები-----	41
თავი 2.	
ელექტროტექნიკური მოწყობილობების დეფექტების აღმოჩენის ელექტრული მეთოდები-----	43
2.1 საიზოლაციო სისტემის მახასიათებლების ელექტრული გაზომვები-----	43
2.2 ძალოვანი ტრანსფორმატორების უქმი სვლის დენისა და დანაკარგების სიმძლავრის განსაზღვრა-----	50
2.3 ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის განსაზღვრა-----	58
2.4 გრაგნილის ომიური წინააღმდეგობის გაზომვა მუდმივი დენის მიმართ-----	60
2.5 დეფექტები ძალოვან ტრანსფორმატორებში-----	67
2.6 თავი 2-ის მიმართ დასკვნები-----	73
თავი 3.	
სითბოგამომყოფი დეფექტები ელექტრომოწყობილობებში-----	74
3.1 სითბოს გამოყოფა ელექტრომოწყობილობებში-----	74
3.2 სითბოს არ გამომყოფი დეფექტები ელექტრომოწყობილობებში-----	80
3.3 სითბოგამომყოფი დეფექტები ელექტრომოწყობილობებში-----	86
3.4 სითბოგამომყოფი დეფექტების აღმოჩენის არათბური მეთოდები-----	89
3.5 დეფექტები ძალოვან ტრანსფორმატორებში-----	92
3.6 თავი 3-ის მიმართ დასკვნები-----	94
თავი 4.	
ელექტროტექნიკური მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევა----	95
4.1 თბოვიზორული გამოკვლევის ნორმები და კრიტერიუმები-----	95
4.2 ელექტრომოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევის პერიოდულობა-----	101
4.3 ტრანსფორმატორის გაცივების სისტემის და თერმოსიფონური ფილტრის დეფექტები-----	104

4.4 მექანიკურად (ჭანჭიკით) შეერთებული კონტაქტების დეფექტები---	106
4.5 თბური დეფექტები ელექტრომოწეობილობის იზოლაციაში-----	113
4.6 თავი 4-ის მიმართ დასკვნები-----	116
დასკვნა-----	118
გამოყენებული ლიტერატურა-----	120

ცხრილების ნუსხა

ცხრ. №1	ძალოვანი ტრანსფორმატორის დეფექტების ანალიზი -----	93
ცხრ. №2	კონტაქტური შეერთებების დასაშვები ტემპერატურები -----	97

ნახაზების ნუსხა

ნახ. №1	ჰერშელის ცდა -----	23
ნახ. №2	ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრი -----	24
ნახ. №3	ინფრაწითელი გამოსხივების სპექტრის სახე -----	25
ნახ. №4	ატმოსფეროში ინფრაწითელი სხივების გაფლის მრუდი ----	28
ნახ. №5	თერმისტორის ტემპერატურული მახასიათებელი -----	32
ნახ. №6	ბოლოტომეტრის სქემა -----	34
ნახ. №7	მატრიცის ელემენტი -----	39
ნახ. №8	თბოვიზორით გამოსახულების ფორმირება-----	40
ნახ. №9	ელექტრული გაზომვის შესაძლებელი სქემები -----	44
ნახ. №10	მეგაომეტრის გამარტივებული ელექტრული სქემა -----	47
ნახ. №11	ცვლადი ძაბვის ბოგირის ელექტრონული გამარტივებული სქემა -----	49
ნახ. №12	სამგრაგნილა ტრანსფორმატორის b და c ფაზებს შორის უქმი სვლის სიმძლავრის და დენის გაზომვის სქემა -----	55
ნახ. №13	სამგრაგნილა ტრანსფორმატორის a და c ფაზებს შორის უქმი სვლის სიმძლავრის და დენის გაზომვის სქემა -----	55
ნახ. №14	სამგრაგნილა ტრანსფორმატორის a და b ფაზებს შორის უქმი სვლის სიმძლავრის და დენის გაზომვის სქემა -----	56
ნახ. №15	ტრანსფორმატორის K -ს დამოკიდებულება დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირებადი გადამრთველის მდგომარეობაზე (n) -----	59
ნახ. №16	ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის განსაზღვრის სქემა -----	59
ნახ. №17	წინააღმდეგობის გაზომვის ოთხზონდიანი მეთოდი -----	61
ნახ. №18	დენის სიდიდის ცვლილება გრაგნილში -----	62
ნახ. №19	ტრანსფორმატორის გრაგნილის $\frac{dI_1}{dt}$ ინააღმდეგობის გაზომვის სქემა მუდმივი დენის მიმართ -----	63
ნახ. №20	ძალოვან ტრანსფორმატორებში გრაგნილების შეერთების სქემები -----	65
ნახ. №21	ტრანსფორმატორის დატვირთვის ქვეშ ძაბვის მარეგულირებელი მოწყობილობის წინააღმდეგობის დამოკიდებულება გადამრთველის მდგომარეობაზე -----	66
ნახ. №22	ზეთიან ტრ-რში ტემპერატურის (t) და ტემპერატურის ნამატის განაწილება -----	78
ნახ. №23	ტრანსფორმატორის რადიატორში ზეთის მოძრაობის სქემა--	83
ნახ. №24	თერმოსიფონური ფილტრის სქემა -----	84
ნახ. №25	ტრანსფორმატორების გაცივების სისტემის რადიატორების არათბური დეფექტების თერმოგრამა-----	104
ნახ. №26	ქვესადგური „კრწანისი“-ის ტ-2 ტრანსფორმატორის თერმოსიფონური ფილტრის თერმოგრამა -----	105
ნახ. №27	ქვესადგური „ზუგდიდი-2“-ის ტ-1 ტრანსფორმატორის თერმოსიფონური ფილტრის თერმოგრამა -----	105
ნახ. №28	ტრანსფორმატორის გაცივების სისტემის დეფექტები-----	106

ნახ. №29	ქვესადგურ „საქასრია“-ს 10კვ დაბვის შემყვანი იზოლატორის დეფექტური კონტაქტის თერმოგრამა-----	107
ნახ. №30	ქვესადგურ „ქობულეთი“-ის 35კვ სასექციო ზ.ა-ის დაბვის შემყვანი იზოლატორზე დეფექტური კონტაქტის თერმოგრამა-----	108
ნახ. №31	ქვესადგურ „კარალეთი“-ის ტ-2 ტრანსფორმატორის 10კვ დაბვის შემყვანი იზოლატორების სამივე ფაზის დეფექტური კონტაქტის თერმოგრამა-----	108
ნახ. №32	ქვესადგურ „ფოთი-3“-ის 35კვ ტ-1 ტრანსფორმატორის „ბ“ ფაზის დაბვის შემყვანის დეფექტური კონტაქტის ტემპერატურის სხვაობის ცვლილება დატვირთვის დენის სიდიდის მიხედვით -----	110
ნახ. №33	ქვესადგური „ფოთი-3“-ის ტ-1 35კვ დაბვის შემყვანი იზოლატორის დაზიანებული კონტაქტის ტემპერატურის ნამატის დამოკიდებულება დატვირთვის დენის სიდიდეზე----	110
ნახ. №34	ქვესადგური „ჩაქვი“-ის 110კვ ე.გ.ხ ციხისძირის სახაზო გამთიშველის „ბ“ ფაზის იზოლატორის დეფექტური კონტაქტის თერმოგრამა, ქარის სიჩქარის სხვადასხვა მნიშვნელობისას-----	111
ნახ. №35	ქვესადგურ „ჩაქვი“-ის სახაზო გამთიშველის დეფექტური კონტაქტის ტემპერატურის და ტემპერატურის ნამატის დამოკიდებულება ქარის სიჩქარეზე -----	112
ნახ. №36	ქვესადგური „ბათუმი-2“-ის 6 კილოვოლტიანი სალტის შეერთების დეფექტის თერმოგრამა-----	112
ნახ. №37	ქვესადგურ „სადმელი“-ის 35კვ ე.გ.ხ „ნაქერალა“-ს სახაზო გამთიშველის დაზიანებული კონტაქტების თერმოგრამა-----	113
ნახ. №38	ქვესადგური „მარნეული-1“-ის 110კვ გამთიშველის დეფექტური იზოლატორის თერმოგრამა-----	114
ნახ. №39	ქ/ს „ბოლნისი“-ის 110კვ მცლელის სექციის ტანსა და თავში არსებული ცხელი წერტილის თერმოგრამა-----	115
ნახ. №40	თბური დეფექტი ქ/ს „ბორჯომი-1“-ის 10კვ ფ. „წვეა-2“-ის კაბელის ყელში -----	115
ნახ. №41	თბური დეფექტი 110კვ დაბვის ტრანსფორმატორის ტანში----	116

შესავალი

მეცნიერული სიახლე. ექსპლუატაციის განმავლობაში სხვადასხვა ფაქტორების მოქმედებით ელექტროტექნიკურ მოწყობილობაში დეფექტები წარმოიქმნებიან. რომლებიც როგორც მოწყობილობის საექსპლუატაციო თვისებებზე ახდენენ გავლენას ასევე ავარიის გამომწვევ მიზეზებად ითვლებიან.

წარმოქმნილი დეფექტები ან სითბოს გამოყოფენ ან სითბოგადაცემის რეჟიმის დარღვევას იწვევენ. ორივე შემთხვევაში მოწყობილობის ზედაპირზე სითბური ველის სურათი იცვლება.

ამ ცვლილების და დეფექტების გამოვლენის მრავალი მეთოდი არსებობს, მაგრამ უმეტესი მათგანი მოწყობილობის ექსპლუატაციის შეწყვეტას და მოწყობილობაზე ელექტრული გაზომვების ჩატარებას მოითხოვს.

თერმოგრაფიული გამოკვლევა ზემოთაღნიშნული პირობის შესრულებას არ მოითხოვს. პირიქით რაც მეტად არის დატვირთული მოწყობილობა დეფექტები მით უფრო აქტიურად გამოვლინდება.

დღეისათვის ელექტროტექნიკური მოწყობილობის თერმოგრაფიული გამოკვლევა დიაგნოსტიკის ერთერთ აუცილებელ მიმართულებას წარმოადგენს და ფართოდ გამოიყენება. ჩვენს ქვეყანაში ის ახალ მიმართულებად ითვლება, მაგრამ წამყვანი ენერგეტიკული კომპანიები ელექტროტექნიკური მოწყობილობების თერმოგრაფიულ გამოკვლევას და მიღებული შედეგებით მოწყობილობის დიაგნოსტიკას ფართოდ იყენებენ.

თერმოგრაფიული გამოკვლევების შედეგის სიზუსტეზე მრავალი ფაქტორი ახდენს გავლენას მათ შორის ქარის სიჩქარე და დატვირთვის დენის მნიშვნელობა.

ნაშრომში გამოკვლეულია ქვესადგურ „ჩაქვის“ სახაზო გამთიშველის დეფექტური კონტაქტის ტემპერატურის და არადეფექტურ კონტაქტთან შედარებით ტემპერატურის ნამატის დამოკიდებულება ქარის სიჩქარეზე. ნაჩვენებია, რომ ქარის სიჩქარის გაზრდა ორივე ტემპერატურის თითქმის 75%-ით შემცირებას იწვევს. რაც დიაგნოსტიკის ჩატარებისას აუცილებლად გასათვალისწინებელია.

გამოკვლეული იქნა ქვესადგურ „ფოთი-3“-ის ტ-1 ტრანსფორმატორის 35 კილოვოლტიანი ძაბვის შემყვანი იზოლატორის დეფექტური კონტაქტის ტემპერატურის ნამატის დამოკიდებულება დატვირთვის დენის სიდიდეზე. ტემპერატურა ისაზღვრებოდა როგორც თერმოგრაფიული გამოკვლევით, ასევე შესაბამისი ფორმულით გამოთვლით. აღმოჩნდა, რომ ფორმულა რეალურთან შედარებით ტემპერატურის მეტ მნიშვნელობას იძლეოდა.

პირველად ჩატარდა თბური დეფექტების დაყოფა სითბოგამომყოფ დეფექტებად (ეგრეთწოდებული „ცხელი წერტილი“) და არასითბოგამომყოფ დეფექტებად, კერძოდ გაცივების სისტემის სითბოგადაცემის დეფექტები.

კვლევის აქტუალობა გამოიხატება მიღებული შედეგების არამარტო მეცნიერული არამედ პრაქტიკული მნიშვნელობით. ისინი გათვალისწინებული უნდა იყოს ელექტროტექნიკური მოწყობილობების მდგომარეობის შეფასებისას.

შედეგები. პირველად მოხდა დეფექტური კონტაქტური შეერთების ტემპერატურის და ტემპერატურის ნამატის ქარის სიჩქარეზე დამოკიდებულების შესწავლა. ამასთანავე გამოვლინდა განსხვავება სხვადასხვა დატვირთვის სიმძლავრის შემთხვევაში, დეფექტური კონტაქტის სპეციალური ფორმულით გამოთვლილ ტემპერატურის სიდიდესა და ტემპერატურის თერმოგრაფიული გამოკვლევით განსაზღვრულ მნიშვნელობას შორის.

ნაშრომის აპრობაცია. ნაშრომის შედეგები წარდგენილი იყო საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის №17 მიმართულების თემატურ სემინარებზე, III კოლოკვიუმზე და დადებითად იქნა შეფასებული.

სტუ-ს სტუდენტთა 82-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე. სადაც დადებითად და დოქტორანტთა შორის II ხარისხის დიპლომით შეფასდა.

1. ლიტერატურის მიმოხილვა

1. (. . .)

„ . . . „ „НЦ7 „, 2002 გვ 211

განხილულია მაღალი დაბვის 120-ზე მეტი ტრანსფორმატორის დაზიანების 162 შემთხვევა, რომელთა უმეტესი 70% გამოვლინდა ტრანსფორმატორის თბოვიზორული კონტროლით. აგრეთვე დეფექტების მნიშვნელოვანი რაოდენობა, 14% მხოლოდ თბოვიზორული კონტროლის საშუალებით გამოვლინდა. ეს ძირითადად ეხებოდა გაცივების სისტემაში ზეთის შეფერხებულად მოძრაობას, ან მაღალი დაბვის შემყვანის თავზე ზეთის გამაფართოებელი სისტემის ჰერმეტიკულობის დარღვევას.

აქვე დასმულია მაღალი დაბვის მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევების აუცილებლობის და ელექტრული გაზომვებთან შედარებით ინფორმაციის ოპერატიული მიღების საკითხი. განზოგადოებულია სხვადასხვა ქვეყნებში ენერგეტიკული მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევების შედეგად მიღებული ინფორმაცია. აღწერილია ზოგადი კანონზომიერებები და პრაქტიკული მაგალითები.

აღწერილია ის დეფექტები რომლებიც მხოლოდ თბოვიზორული გამოკვლევებით გამოვლინდება ან მათ მხოლოდ ელექტრული გაზომვები გამოავლენს. ცალკეა კლასიფიკაცია იმ დეფექტების, რომლებიც ორივე მეთოდით გამოვლინდებიან.

2. -6- . . .12. 34.45-51.300-97 . . . : 7 2002

განხილულია სხვადასხვა სახის მაღალი დაბვის ელექტროტექნიკური მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევების პერიოდულობა ტემპერატურის ნამატის და სიჭარბის ზღვრები. თბოვიზორული გამოკვლევებით მიღებული შედეგებით დეფექტურობის კოეფიციენტის დადგენის მეთოდები და ამ კოეფიციენტით ავარიული საშიშროების შეფასების მეთოდები.

მოყვანილია კონტაქტის გადახურების საანგარიშო ფორმულები, როდესაც კონტაქტში გამავალი დენი ნომინალურზე ნაკლებია და ამ ფორმულებით დეფექტის ავარიულობის შეფასება.

3. . . . : 1997. 7 . 15-18.

განხილულია იმ თბოვიზორული კამერების და დისტანციური ინფრაწითელი სხივის პირომეტრების მახასიათებლების დადებითი და უარყოფითი მხარეები, რომლებიც ელექტროტექნიკური მოწყობილობების დიაგნოსტიკისთვის გამოიყენება.

დასახულია მათი განვითარების პერსპექტივები არსებული ნაკლოვანების გათვალისწინებით.

4. . . . „-200 76 გვ.

ფართოდ არის განხილული თბოვიზორების გამოყენებით ძალოვანი და მზომი ტრანსფორმატორების, ავტოტრანსფორმატორების, რექტორების, ძაბვის შემყვანების, გამთიშველების და ამომრთველების სხვადასხვა სახის კონტაქტების გამოკვლევის შედეგები, გამოკვეთილია საერთო და ზოგადი კანონზომიერებები.

განხილულია ძაბვის შემყვანების და ძალოვანი კაბელების საიზოლაციო სისტემაში თერმოგრაფიული გამოკვლევით თბური დეფექტების აღმოჩენის და დიაგნოსტიკის თავისებურებები.

აქვე განხილულია თბოვიზორული კამერების ტიპები მათი მუშაობის თავისებურებები და მახასიათებელი პარამეტრები.

გაანალიზებულია ინფრაწითელი გამოსახულების და თერმული სურათის ადამიანის თვალისადმი აღქმად სპექტრში წარმოსახვის ანუ გამოსახულების აგების პრინციპები და მეთოდები. ნაჩვენებია სხვადასხვა სახის ეკრანების უპირატესობები და ნაკლოვანებები.

5. . . . „ “ . 1976; 53 .

აღწერილია ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრი, ინფრაწითელი სხივების აღმოჩენის ისტორია, გავრცელება და შთანთქმა გარემოში, გარდატეხის არეკვლის და შთანთქმის კანონები.

განხილულია ინფრაწითელი სხივის მოწყობილობების მუშაობის პრინციპები და თავისებურებები.

6. . . . ; ;

„ 1987

განხილულია ინფრაწითელი სხივის ხელსაწყოების შექმნის ძირითადი პრინციპები, გამოყენებული ხელსაწყოები, გარემოს ტემპერატურის კომპენსაციის სხვადასხვა სქემები და მეთოდები. აღწერილია ბოლომეტრების და თერმისტორების მუშაობის პრინციპები. ამ მეთოდების ფიზიკური საფუძვლები და მისი განხორციელების გზები.

7.

„ 2000 5; 46 .

აღწერილია მაღალი ძაბვის (110-500კვ) სხვადასხვა სახის 300-მდე მოწყობილობის თერმოგრაფიული გამოკვლევის შედეგები, სხვადასხვა ატმოსფერული და ტემპერატურულ პირობებში. გაანალიზებულია ამ გამოკვლევის შედეგები. რის საფუძველზეც ჩამოყალიბებულია თერმოგრაფიული გამოკვლევის ოპტიმალური პირობები და რეჟიმები.

მნიშვნელოვანი ყურადღება აქვს დათმობილი თერმოგრაფიული გამოკვლევისას ელექტროუსაფრთხოების და საერთოდ უსაფრთხოების საკითხებს.

8.

;

„ 1996; 8 61-64 .

გაანალიზებულია რუსეთის ფედერაციის კოლის ენერგოსისტემაში თბოვიზორებით ელექტრომოწყობილობების დიაგნოსტიკის გამოცდილება და მიღებული შედეგები. აგრეთვე აღწერილია დეფექტების ის სახეები, რომლებიც უფრო ფართოდ არის გავრცელებული ამ ენერგოსისტემაში.

გაანალიზებულია პრაქტიკაში გამოსაყენებელი და ზოგჯერ აუცილებელი ის ჩვევები, რომლებიც ავტორებს წლების განმავლობაში დაუგროვდათ.

9.

„ 2000; 2 . 34

გადმოცემულია მაღალი ძაბვის (110-500კვ) ძალოვანი ტრანსფორმატორების, ავტოტრანსფორმატორების და რეაქტორების თერმოგრაფიული გამოკვლევების ნორმები და პირობები.

აღწერილია მიღებული შედეგები და ზოგადი რეკომენდაციები ამ სახის გამოკვლევების ჩასატარებლად.

10.

;”

“

2000 6 58-63 .

გაანალიზებულია ის დეფექტები, რომლებიც ელექტროტექნიკური მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევებით და ელექტრული გაზომვებით გამოვლინდა და რემონტის ჩატარებისას მათი არსებობა დადასტურდა.

ნაჩვენებია ზეგირთი სახის დეფექტების გამოსავლენად თბოვიზორული გამოკვლევის უპირატესობა. აგრეთვე აღნიშნულია ელექტრული გაზომვების შეუცვლელობა, მაგრამ პროფილაქტიკის თვალსაზრისით ავტორებმა უპირატესობა თბოვიზორულ გამოკვლევებს მიანიჭეს.

2. შედეგები და მათი განსჯა

მაღალი ძაბვის მოწყობილობების თბოვიზორულმა გამოკვლევებმა გამოავლინა, რომ თბური დეფექტების ნაწილი ელექტრული მოვლენებით არის განპირობებული ნაწილი კი სითბური რეჟიმების დარღვევას უკავშირდება.

ყველაზე ფართოდ გავრცელებულ თბურ დეფექტებს კონტაქტური შეერთების გარდამავალი წინაღობის გაზრდა განაპირობებს. ამ სახის დეფექტის ტემპერატურა დატვირთვის დენის გაზრდით იზრდება და უმეტეს შემთხვევაში მისი სიდიდე ნორმით დასაშვებს აღემატება. ხშირად დეფექტურობის კოეფიციენტი ავარიულ დეფექტის არსებობაზე მიუთითებს, რაც დაუყოვნებლივ უნდა გამოსწორდეს.

გამაცივებელი სისტემის და თერმოსიფონური ფილტრების დეფექტები მართალია არათბურ დეფექტებს მიეკუთვნებიან, მაგრამ ისინი ნორმალურ საექსპლუატაციო რეჟიმს არღვევენ, იწვევენ სითბური

რეჟიმის დარღვევას და ავარიის განვითარების ხელსაყრელ პირობებს ქმნიან.

გამოკვლევებით მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ საიზოლაციო სისტემის დეფექტები (ძაბვის შემყვანები, მაღალი ძაბვის კონდენსატორები და ზეთით შევსებული ამომრთველები) შედარებით დაბალი ტემპერატურული ნამატით ხასიათდებიან, მაგრამ სწრაფად განვითარებად დეფექტებს მიეკუთვნებიან და ავარიის ძირითად წყაროს წარმოადგენენ.

ექსპერიმენტალური გამოკვლევებით დადგინდა, რომ დეფექტური კონტაქტური შეერთების ტემპერატურაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს დატვირთვის დენის სიდიდე და ქარის სიჩქარე. ორივე შემთხვევაში გამოვლინდა, რომ სპეციალური ფორმულებით ტემპერატურის გამოთვლა ან ტემპერატურის ნამატის განსაზღვრა ტემპერატურის უფრო მეტ სიდიდეს იძლევა ვიდრე მისი თერმოგრაფიული გამოკვლევით გაზომვა. ეს სხვაობა მით მეტია რაც მეტია დატვირთვის დენის სიჭარბე ნომინალურთან შედარებით.

გამოვლინდა, რომ საექსპლუატაციო ნორმატიული დოკუმენტით განსაზღვრული თერმოგრაფიული გამოკვლევების პერიოდულობა რეალურთან შედარებით გადაჭარბებულია, რადგან ეს დოკუმენტი შექმნილია შედარებით ახალი ელექტროტექნიკური მოწყობილობების საექსპლუატაციო გამოცდილებისგან გამომდინარე და ჩვენთან არსებული მოწყობილობების ექსპლუატაციის ხანგრძლივობას არ ითვალისწინებს.

აღსანიშნავია ისიც, რომ მრავალი დეფექტი საექსპლუატაციო ნორმების დარღვევის ან მოძველებული მოწყობილობების ექსპლუატაციის შედეგად წარმოიქმნება და სწრაფად ვითარდება. ამის გამო მიზანშეწონილად შეიძლება ჩაითვალოს თერმოგრაფიული გამოკვლევების პერიოდულობის თითქმის ორჯერ შემცირება.

3. ექსპერიმენტალური ნაწილი

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარდა დეფექტების კლასიფიკაცია, მოხდა მათი შეფასება სითბური რეჟიმის და სითბოს გამოყოფის

თვალსაზრისით, ასევე მაღალი ძაბვის ელექტროტექნიკური მოწყობილობების დეფექტები დაიყო სითბოგამომყოფ და არასითბოგამომყოფ დეფექტებად.

ჩატარდა ანალიზი მაღალი ძაბვის ტრანსფორმატორებში, ძაბვის შემყვანებში, საკონტაქტო შეერთებებში სითბოს გამოყოფის და მისი გარემოზე გადაცემის მექანიზმის. ამასთანავე გავითვალისწინეთ ატმოსფეროში ინფრაწითელი სხივების შთანთქმის და გაბნევის მოვლენა.

ექსპერიმენტალურად გამოკვლეული იქნა ქვესადგურ „ფოთი-3“-ის 35კილოვოლტიანი ტ-1 ტრანსფორმატორის მაღალი ძაბვის შემყვანი იზოლატორის დაზიანებული კონტაქტური შეერთების ტემპერატურის დამოკიდებულება დატვირთვის დენის სიდიდეზე. ნაჩვენები იქნა, რომ დატვირთვის სიმძლავრის გაზრდით კონტაქტის ტემპერატურა იზრდება. ტემპერატურის უფრო მნიშვნელოვანი ზრდა შესაბამისი ფორმულებით ანგარიშისას გამოვლინდა ვიდრე პირდაპირი თერმოგრაფიული გამოკვლევით, რაც იმით აისხნება, რომ სიმძლავრის გაზრდით გამოყოფილი სითბოსა და გარემოს შორის სითბური ბალნის დამყარება გარკვეულ დროს მოითხოვს. როდესაც დატვირთვის სიმძლავრე ნომინალური სიმძლავრის 70%-ს შეადგენს ამ ორ ტემპერატურას შორის სხვაობა რამოდენიმე გრადუსია, მაგრამ სიმძლავრის გაზრდით ეს სხვაობა იზრდება და ნომინალურ სიმძლავრეზე 10 °C შეადგენს, ხოლო თუ დატვირთვის სიმძლავრე ნომინალურ სიმძლავრეს 10%-ით აღემატება მაშინ თბოვიზორით გაზომილ ტემპერატურასა და სპეციალური ფორმულით გამოთვლილ კონტაქტის ტემპერატურას შორის სხვაობა 13 °C აღემატება, რაც მნიშვნელოვანი სიდიდეა და პრაქტიკულად გასათვალისწინებელია.

ქვესადგურ „ჩაქვი“-ის 110კვ ე.გ.ხ „ციხისძირი“-ის სახაზო გამთიშველის დეფექტური კონტაქტის მაგალითზე ექსპერიმენტალურად შესწავლილი იყო კონტაქტის ტემპერატურის და კონტაქტის ტემპერატურის ნამატის დამოკიდებულება ქარის სიჩქარეზე. გამოვლინდა, რომ ქარის სიჩქარის გაზრდით ორივე ეს ტემპერატურა მცირდება, მაგრამ რაც მეტია ქარის სიჩქარე მით მეტია ამ ტემპერატურებს შორის განსხვავება.

მაღალი ძაბვის შემყვანების და ძალოვანი კაბელების საიზოლაციო სისტემის დეფექტების გამოკვლევამ აჩვენა, რომ ისინი საიზოლაციო მასალის დეფექტებით არიან განპირობებული. მათი დეფექტურობის კოეფიციენტი მცირე სიდიდის არის, მაგრამ თვით დეფექტი სწრაფად განვითარებადია.

მექანიკური შეერთების კონტაქტის დეფექტურობა, კონტაქტის გარდამავალი წინაღობის გაზრდით არის განპირობებული და ძირითადად უხარისხო შეერთება წარმოქმნის.

თერმოგრაფიული გამოკვლევებით დადგინდა, რომ გაცივების სისტემის დეფექტებს, ან ზეთსავალი არხების და თერმოსიფონური ფილტრების ზეთის დაძველების პროდუქტებით გაბიძვნა წარმოქმნის, ან ზოგიერთ შემთხვევაში შესაბამისი ფარსაკეტების გაუსხნელობა იწვევს.

თავი 1. ამოცანის დასმა

1.1 ინფრაწითელი სხივები

1800 წელს ინგლისელმა მეცნიერმა ვ. ჰერშელმა სინათლის თეორიის სხივის პრიზმაში დაშლის შემდეგ გადაწყვიტა ამ სპექტრის ცალკეული ელემენტების თბური ძალა განესაზღვრა. ამისათვის ის სპექტრის ყველა ფერში ვერცხლისწყლიან მგრძობიარე თერმომეტრს ათავსებდა. აღმოჩნდა, რომ ყველაზე ნაკლები ენერგიით (სითბური ეფექტი, თერმომეტრის გათბობა) წითელი სხივები, ხოლო მეტით იისფერი სხივები ხასიათდებიან, მაგრამ თერმომეტრმა იისფერი სხივების გვერდი აჩვენა, რომ იყო ადამიანის თვალისთვის უხილავი სხივები – ულტრაიისფერი, რომელიც უფრო მეტი ენერგიით ხასიათდებოდა ვიდრე იისფერი [1]. მან ასევე აღმოაჩინა, რომ წითელი სხივების ქვემოთაც იყო გამოსხივების თვალისთვის უხილავი სპექტრი, რომელსაც ინფრაწითელი სხივები ეწოდა. (ნახ. №1).



ნახ. №1 ჰერშელის ცდა

ინფრაწითელი და ულტრაიისფერი სხივები სხეულის გამოსხივების ნაწილია და ის ადამიანის თვალისთვის მგრძობიარე ხილულ გამოსხივებასთან ერთად გამოსხივდება. გამომუშავდება მაშინ თუ გამოსხივების სპექტრიდან ოპტიკური საშუალების ან სხვა მგრძობიარე ხელსაწყოთი გამოვყოფთ.

გამოკვლევებით დადგინდა, რომ სინათლის გამომსხივებელი სხეულის ტემპერატურის გაზრდით მართალია მისი გამოსხივების

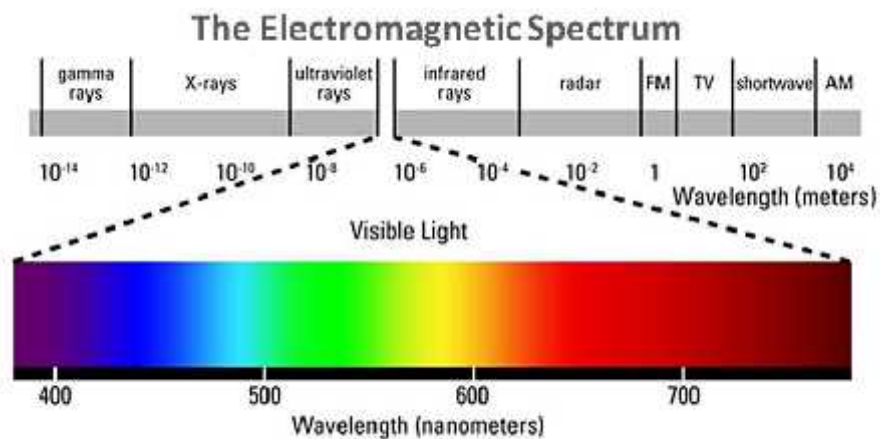
ინტენსივობა იზრდება, მაგრამ ყველაზე მეტად ეს ზრდა ინფრაწითელი გამოსხივების ინტენსივობის მატებაში გამოისახება.

ინფრაწითელი გამოსხივების ტალღის სიგრძე (ნახ. №2) ზოგადად წითელი სხივების ქვედა საზღვარიდან (0,74 მკმ) იწყება და რადიოსიხშირული გამოსხივების ულტრამოკლე სხივების ზედა საზღვრით მთავრდება (2000 მკმ). ის თავის მხრივ პირობითად სამ ნაწილად იყოფა.

1. უახლოეს ინფრაწითელ ტალღებად 0.74 მკმ-დან 2,5 მიკრომეტრამდე. ის ყველაზე ახლოს არის წითელ გამოსხივებასთან;

2. საშუალო ტალღები 2,5 მკმ-დან 6 მიკრომეტრამდე, ასეთი ტალღები უფრო მეტად გამოიყენება პრაქტიკაში და ფიზიკური მოვლენების ამსახველს წარმოადგენს.

3. შორეული ინფრაწითელი ტალღები, მათი სიგრძე 6 მკმ-დან 20 მიკრომეტრამდეა და ნაკლებად გამოიყენება სპექტრს წარმოადგენს.



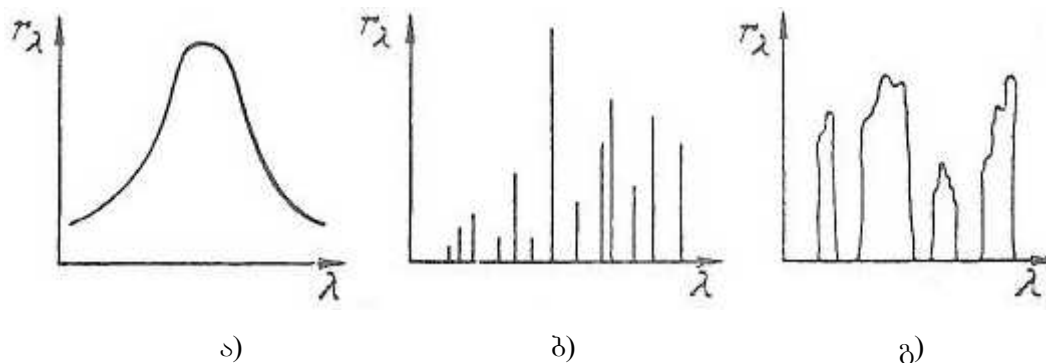
ნახ. №2 ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრი

წარმოშობის მიხედვით, როგორც ხილული ასევე ინფრაწითელი გამოსხივება შეიძლება იყოს:

1. წრფივი, რომელსაც აგზნებული ატომი ან იონი გამოასხივებს და მას ატომურ სპექტრს უწოდებენ (ნახ. №3 ბ);

2. უწყვეტი, რაც მთელ სპექტრში ან მის ნაწილში მის არსებობას (უწყვეტობას) ნიშნავს. ასეთ სპექტრს გამთბარი (გახურებული) სითხე ან მყარი სხეული გამოასხივებს. (ნახ. №3 ა);

3. სპექტრის სხვადასხვა ტალღის სიგრძეზე მცირე ინტერვალში გამოსხივების სპექტრის არსებობა. ასეთ გამოსხივებას აგზნებული მოლეკულა ასხივებს და მას ინფრაწითელი გამოსხივების სპექტრის მოლეკულურ ნაწილს უწოდებენ. (ნახ. №3 გ)



ნახ. №3 ინფრაწითელი გამოსხივების სპექტრის სახე
 ა) უწყვეტი, ბ) წრფივი, გ) ზოლოვანი

არსებობს აგრეთვე ამ სპექტრების ნარევი, რომელიც ორი ან რამოდენიმე გამოსხივების წყაროს ზედღებით მიიღება [2].

როგორც ვხედავთ ნივთიერების სხვადასხვა მდგომარეობას ინფრაწითელი გამოსხივების სპექტრის სხვადასხვა ტალღის სიგრძე შეესაბამება. სხეულის ტემპერატურულ მდგომარეობას ყველაზე კარგად ინფრაწითელი გამოსხივების უწყვეტი სპექტრი ასახავს. გამოკვლევებით დადგენილია, რომ 1 მკმ-დან – 20 მკმ-მდე ტალღის სიგრძეში ტემპერატურის $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ -დან $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ -მდე დიაპაზონში გამოსხივების ინტენსივობა გარკვეული კანონზომიერებით ტემპერატურის სიდიდის პროპორციულია [3].

ინფრაწითელ სხივებს ასხივებს ყველა სხეული, რომლის ტემპერატურა აბსოლუტურ ნულს აღემატება, რაც მეტია სხეულის ტემპერატურა მით მეტი ინტენსივობით ასხივებს ის ინფრაწითელ სხივებს და მას ზოგჯერ თბურ გასხივებასაც უწოდებენ.

მზის მიერ კოსმოსში გამოსხივებული ენერგიის ნახევარი ინფრაწითელ სპექტრზე მოდის, ხოლო ვოლფრამის სპირალიანი ვარვარების ნათურის გამოსხივების სპექტრის 70-80% ინფრაწითელ სპექტრს წარმოადგენს. ასევე გრაფიტის ელექტროდებიანი განმუხტვის რკალის 90% ინფრაწითელი სპექტრი წარმოადგენს. როდესაც სხეულის

ტემპერატურა 400 °C აღემატება, მაშინ მისი გამოსხივების სპექტრის ინტენსივობა 30-80%-მდე ინფრაწითელ სპექტრში იმყოფება [4].

ინფრაწითელი გამოსხივების ძლიერ წყაროებს სხვადასხვა სახის ლაზერები წარმოადგენენ, კერძოდ ჰელიუმ-ნეონის ლაზერი 1,15 და 3,39 მიკრომეტრი ტალღის სიგრძის ინფრაწითელი გამოსხივების წყაროა, ხოლო CO₂-ის ლაზერი კი 10,6 მკმ ტალღებს ასხივებს. ნახევრადგამტარული შენაერთის Insb ბაზაზე შექმნილი მყარტანიანი ლაზერი 5 მიკრომეტრი ტალღის სიგრძით ხასიათდება, ხოლო წყლის ორთქლით შექმნილი ლაზერი 12 მკმ-დან 22 მიკრომეტრამდე ტალღის სიგრძის დიაპაზონში გამოსხივების მრავალი დისკრეტული ხაზით ხასიათდება.

როგორც ვხედავთ საშუალო ტალღის სიგრძეებზე (2,5-5 მკმ) ინფრაწითელი გამოსხივების სპექტრის ის ნაწილი რომელიც სხეულის ტემპერატურით არის განპირობებული კარგად უკავშირდება ტემპერატურას და მისი გაზრდით გამოსხივების ინტენსივობა იზრდება.

1.2 ინფრაწითელი გამოსხივების თვისებები

ინფრაწითელი სხივები ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას მიეკუთვნება, მაგრამ ზოგიერთი თვისებებით, როგორცაა გამჭვირვალობა, არეკვლის და გარდატეხის კოეფიციენტები ინფრაწითელი სხივები მნიშვნელოვნად განსხვავდება ხილული და ულტრაიისფერი სხივებისგან.

მრავალი ნივთიერება რომელიც გამჭვირვალეა ხილული სხივებისთვის პრაქტიკულად გაუმჭვირვალეა ინფრაწითელი სხივების ზოგიერთი სპექტრისთვის, მაგალითად წყლის რამოდენიმე სანტიმეტრის ფენა პრაქტიკულად არ ატარებს ინფრაწითელ სხივებს, რომელთა ტალღის სიგრძე 1 მკმ-ს აღემატება. ხოლო თუ ამავე წყლის სისქე 2 მილიმეტრს არ აღემატება მაშინ ის გამჭვირვალეა.

სხივები რომელთა ტალღის სიგრძე 1,8 მკმ-ს აღემატება თავისუფლად გადიან. შავი ქაღალდი რომელიც ხილულ სხივებს არ ატარებს გამჭვირვალეა ინფრაწითელი გრძელი ტალღებისთვის.

ზემოთაღნიშნული თვისება, კერძოდ ნივთიერება, რომელიც კარგად ატარებს ინფრაწითელი სხივების თითქმის მთელ სპექტრს და არ ატარებს ხილულ და ულტრაიისფერ სხივებს ფართოდ გამოიყენებიან შუქვილტრების დასამზადებლად, რომელთა დანიშნულებაა გამოსხივების მთელი ელექტრომაგნიტური სპექტრიდან გამოყოს მხოლოდ ინფრაწითელი სხივები.

უმეტესი მეტალები მყარ მდგომარეობაში ხასიათდებიან ინფრაწითელი გამოსხივების მაღალი არეკვლის უნარით. ზოგჯერ მათი არეკვლის კოეფიციენტის სიდიდე ინფრაწითელ სპექტრი ხილულ სპექტრში სინათლის სხივის არეკვლის კოეფიციენტს აღემატება და არეკვლის კოეფიციენტი ტალღის სიგრძის სიდიდის მატების მიხედვით იზრდება და თითქმის 100% აღწევს. მაგალითად ალუმინის, ოქროს, ვერცხლის და სპილენძის არეკვლის კოეფიციენტი ინფრაწითელი სხივებისთვის რომელთა ტალღის სიგრძე 10 მიკრომეტრის ტოლია 98,9% აღწევს.

არამეტალური ნივთიერებები თხევად და მყარ მდგომარეობაში ინფრაწითელ სხივებს არათანაბრად აირეკლავენ. არეკვლის კოეფიციენტის მაქსიმუმს ამ ნივთიერებებში არსებული ქიმიური კავშირები და ნივთიერების ქიმიური შემადგენლობა განაპირობებს. შესაბამისად ეს თვისება შეიძლება ნივთიერების ქიმიური შემადგენლობის ანალიზისთვის გამოვიყენოთ.

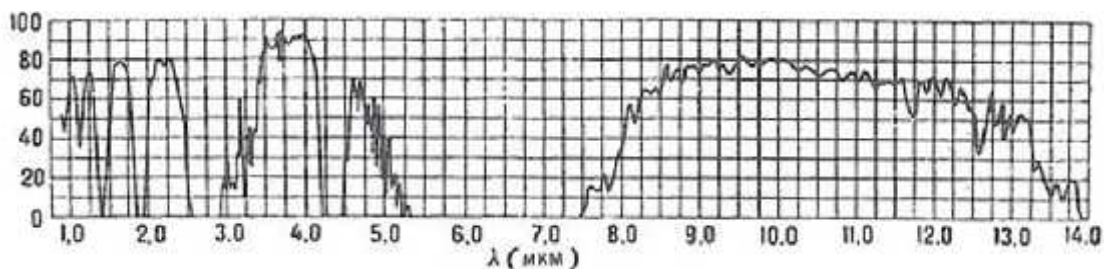
რადგან ინფრაწითელი სხივის ხელსაწყოების პრაქტიკული გამოყენება დედამიწის ატმოსფეროს პირობებში წარმოებს, ამის გამო შესწავლილი იყო ინფრაწითელი გამოსხივების მთელი სპექტრის დედამიწის ატმოსფეროში გავლისას სხივების შესუსტების გამოვლენა. აღმოჩნდა რომ სხვადასხვა ტალღის სიგრძეზე ადგილი აქვს სხივების სრულ შესუსტებას, ხოლო ზოგიერთ ტალღის სიგრძეზე შესუსტება უმნიშვნელოა. თითქმის არ აღმოჩნდა ინფრაწითელი სხივების ისეთი ტალღის სიგრძე, რომელზეც ადგილი არ ქონდეს თუნდაც უმნიშვნელო შესუსტებას (5%), არსებობს ისეთი ტალღის სიგრძეები, სადაც შესუსტება 100%-ია.

ატმოსფეროში ინფრაწითელი სხივების შესუსტება ძირითადად სხივების გაბნევით ან შთანთქმის საშუალებით ხდება.

ატმოსფეროს ძირითადი კომპონენტების აზოტის და ჟანგბადის მოლეკულები ინფრაწითელ სხივებს არ შთანთქავენ. ისინი მათ უმნიშვნელო გაბნევას იწვევენ, ამასთანავე გაბნევის კოეფიციენტი ინფრაწითელი სხივებისთვის უფრო მცირეა ვიდრე ხილული სხივებისთვის, მაგრამ ატმოსფეროში მყოფ წყლის ორთქლს (H_2O), ნახშირორჟანგს (CO_2) და ოზონს (O_3) ინფრაწითელი სხივების მიმართ გააჩნიათ ამორჩევითი შთანთქმის უნარი. არის ტალღის სიგრძეები სადაც ინფრაწითელი სხივების სრულ შთანთქმას აქვს ადგილი, მაგრამ წყლის ორთქლით შთანთქმას ინფრაწითელი სხივების მთელ სპექტრში აქვს ადგილი, ამასთანავე ტალღის სიგრძის მიხედვით შთანთქმის კოეფიციენტი ძლიერ იცვლება. ინფრაწითელი სხივების გრძელ ტალღებზე თავს ნახშირორჟანგით გამოწვეული შთანთქმა იჩენს.

ატმოსფეროში არსებული მტვრის ნაწილაკები, კვამლი, წყლის მცირე ზომის წვეთები ასევე დამატებით იწვევენ ინფრაწითელი სხივების გაბნევას, რაც თავის მხრივ გამოსხივების შესუსტებას განაპირობებს. ამ ნაწილაკების ზომის გაზრდით გაბნევის კოეფიციენტი იზრდება, ხოლო ნაწილაკების მცირე ზომისას, ზომის შემცირებით ინფრაწითელი სხივების გაბნევის კოეფიციენტი მცირდება. როდესაც ინფრაწითელი სხივების ტალღის სიგრძე ტოლი ან მეტია ნაწილაკების ზომებზე, მაშინ გაბნევას ადგილი არ აქვს, მაგრამ იზრდება შთანთქმის კოეფიციენტი.

ნახ. №4-ზე მოყვანილია დედამიწის ატმოსფეროში ინფრაწითელი სხივის გავლის ინტენსივობის დამოკიდებულება სხივის ტალღის სიგრძეზე. ამ დამოკიდებულებას ატმოსფეროში ინფრაწითელი სხივის გავლის მრუდს უწოდებენ. ამ მრუდიდან კარგად ჩანს ინფრაწითელი სხივის სრული შესუსტება. ასევე ახივის უმნიშვნელო შესუსტების არეც.



ნახ. №4 ატმოსფეროში ინფრაწითელი სხივების გავლის მრუდი

დედამიწის ზედაპირის მახლობლად საშუალო სიგრძის ინფრაწითელ სხივებში სადაც სხივების ინტენსივობის შემცირება უმნიშვნელოა ე.ი. უმეტესი სხივები გადის და გასული სხივების ინტენსივობა ტალღის სიგრძის გაზრდით უმნიშვნელოდ იცვლება ატმოსფეროში ინფრაწითელი სხივების გამჭვირვალების „ფანჯარა“-ს უწოდებენ. როგორც ნახ №4-დან ჩანს ასეთი მცირე ზომის „ფანჯარა“ 1 მიკრომეტრიდან 5 მიკრომეტრამდე ტალღის სიგრძის ინფრაწითელი სხივებისთვის მცირე ზომისაა და ამ დიაპაზონში ხუთია. ისინი მცირე საფარის არის და პრაქტიკულად ძნელად გამოსაყენებელია, მაგრამ ამ დიაპაზონში შედარებით დიდი ზომის სტაბილური „ფანჯარა“ 3,5 მიკრონიდან 4,2 მიკრონამდე დიაპაზონშია, რაც ზოგიერთი ტიპის თბოვიზორების ძირითად მუშა ან დამატებით დიაპაზონს წარმოადგენს.

ყველაზე სტაბილური და ფართო „ფანჯარა“ 8,0 მიკრონიდან 13 მიკრონამდე ტალღის სიგრძის ინფრაწითელი სხივებისთვის ყველა ტიპის ინფრაწითელი სხივის იმ ხელსაწყოების დასამზადებლად გამოიყენება, რომლებიც ატმოსფეროს პირობებში მუშაობენ.

ნახ. №1-ზე ინფრაწითელი სხივის შთანთქმის პირველი სამი უბანი წყლის ორთქლს მიეკუთვნება, ხოლო მეოთხე (4,26 მკმ) ნახშირორჟანგს, რაც შეეხება შთანთქმის ფართო სპექტრს 5,0 მიკრომეტრიდან 8,0 მიკრომეტრამდე ის ოზონის არსებობით არის გამოწვეული, რომლის რაოდენობა დედამიწის ზედაპირზე უმნიშვნელოა და თუ მისი წარმოქმნა ხელოვნურად არ ხდება (ნაწილობრივი განმუხტვა, ოზონატრი, მაღალი სიხშირის განმუხტვები და სხვა) მაშინ შთანთქმის ეს ბოლო უბანი შეიძლება მხედველობაში არ მივიდეთ.

1.3 ინფრაწითელი გამოსხივების მიმღები და გარდამსახი მოწყობილობები

ინფრაწითელი გამოსხივება ან გამოსხივებით განათებული გარემო ადამიანის თვალისთვის უხილავია, მაგრამ ბუნებაში არსებობენ ცხოველები (ქვეწარმავლები), რომლებიც გარკვეული სიგრძის ინფრაწითელ სხივებს აღიქვამენ. მათი აღქმა ეგრედწოდებული თბური

რეცეპტორებით წარმოებს, რომელთა ზომები რამოდენიმე მილიმეტრს არ აღემატება და მათზე 10^{-12} ვატი სიმძლავრის ინფრაწითელი გამოსხივების მოქმედება ელექტრულ სიგნალს აღძრავს, რომელიც ცხოველის თავის ტვინს მიეწოდება.

ცხოველები, რომლებიც ღამით ნადირობენ და დღისით დამალული არიან ინფრაწითელი სხივების მიმართ მხედველობით ხასითდებიან. მათი თვალი, ან თვალის ნაწილი ინფრაწითელი სხივებით განათებულ გარემოს (მთვარის სინათლე) კარგად ხედავენ.

მწერების (ფუტკარი, კრაზანა) ხუთი თვალიდან ორი ინფრაწითელი სხივების აღქმის ფუნქციას ასრულებს და მას „ღამის თვალებს“ უწოდებენ.

აქედან გამომდინარე ინფრაწითელი სხივების პრაქტიკული გამოყენება და აღქმა ბუნებაში ფართოდ არის გავრცელებული და ზოგჯერ ხილულ სპექტრთან შედარებით ეფექტურია.

თანამედროვე ტექნიკაში ინფრაწითელი გამოსხივების მიმღები მოწყობილობები დაფუძნებულია სხივების ენერჯის იმ სახის ინერჯიად ან სიგნალად გარდაქმნაში, რომელიც შესაძლებელია ჩვეულებრივი საშუალებით გაიზომოს, აღიქვას ადამიანის თვალმა ან აისახოს ეკრანზე.

ყველა ეს ხელსაწყოები ინფრაწითელი სხივების მოქმედებით ნივთიერებაში წარმოქმნილი ცვლილების აღქმაზეა დაფუძნებული და თბურ, ოპტიკურ, ელექტრულ და ელექტრო-ოპტიკურ მოწყობილობებად იყოფიან.

ინფრაწითელი სხივების თბური მიმღები ხელსაწყოები სხივების შთანთქმით გამოწვეული ტემპერატურის მატებას აღრიცხავს, ხოლო ინფრაწითელი სხივების ფოტოელექტრული მიმღები მოწყობილობებში სხივების შთანთქმით ან ფოტოდენი წარმოიქმნება ან ფოტოელექტრომამოძრავებელი ძალა.

ინფრაწითელი გამოსხივების ფოტოელექტრული მიმღებები თბური მიმღებებისგან განსხვავებით სელექტიური (არჩევითი) თვისებებით სახიათდებიან, კერძოდ ისინი მგრძნობიარენი არიან ინფრაწითელი გამოსხივების სპექტრის გარკვეული ტალღის სიგრძის მიმართ.

ინფრაწითელი გამოსხივების აღმოსაჩენი ხელსაწყო როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ იყო ვერცხლისწყლიანი მგრძნობიარე თერმომეტრი რომელიც ვ. ჰერშელმა გამოიყენა. ის რათქმაუნდა დიდი ზომით და ინერციულობით ხასითდებოდა.

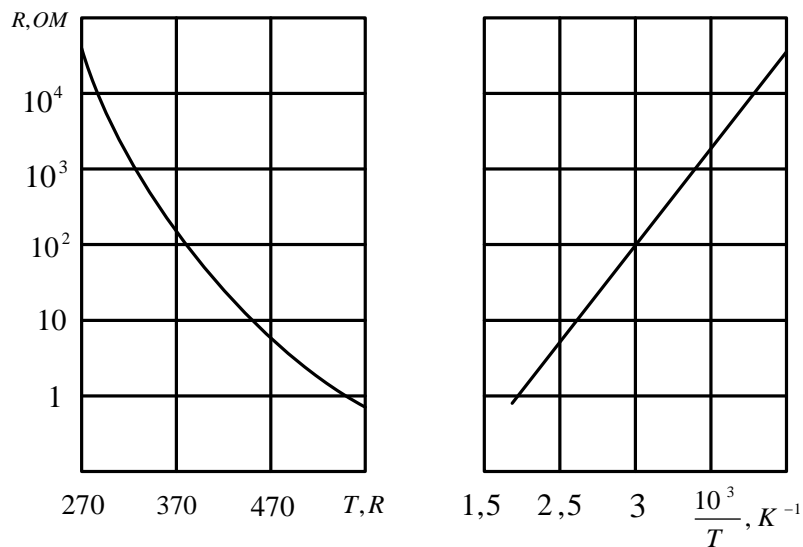
ტექნიკის განვითარებასთან ერთად განვითარდა ინფრაწითელი სხივების აღმქმელი ხელსაწყოების ტექნიკური მახასიათებლები და დღეისათვის ისინი თერმორეზისტორების, ბოლომეტრების და ინფრაწითელი სხივის აღმქმელი ფოტოელექტრული ხელსაწყოების სახით არიან წარმოდგენილი.

ცნობილია, რომ ნახევრადგამტარის წინაღობა ტემპერატურის გაზრდით მცირდება, ხოლო თუ ნახევრადგამტარის აკრძალული ზონის სიდიდე 1 ელექტრონ ვოლტს არ აღემატება, მაშინ ტემპერატურის ერთი გრადუსით მატებისას წინაღობა შეიძლება რამოდენიმე ათეულჯერ შემცირდეს. ასეთივე თვისებით ხასიათდება ზოგიერთი ნახევრადგამტარული თვისების მქონე ჟანგეულებიც (მაგალითად ვანადიუმის ჟანგეულები V_2O_3 და V_2O_4 ან მათი ნარევი) თუ ამ თვისების მქონე ჟანგეულის თხელ ფენას გავუკეთებთ ინფრაწითელი სხივების მიმართ გამჭვირვალე ორ ელექტროდს, მაშინ მივიღებთ თერმისტორს, რომელსაც თუ მივაწოდებთ მცირე სიდიდის მუდმივ ძაბვას და წრედში ჩავრთავთ რეზისტორს, რომელზეც ძაბვის ვარდნის გაზომვას მოვახდენთ მაშინ ინფრაწითელი სხივების ინტენსივობის ცვლილებით პროპორციულად შეიცვლება რეზისტორზე ძაბვის ვარდნა, რომლის რეგისტრაციით შეიძლება ინფრაწითელი სხივების აღრიცხვა.

თერმისტორების ერთ-ერთ ნაირსახეობას ბოლომეტრები წარმოადგენენ, რომლებიც მაღალი მგრძნობიარობით და სწრაფმოქმედებით ხასიათდებიან.

თერმისტორების და ბოლომეტრების ერთ-ერთი ძირითადი მახასიათებელია მისი წინაღობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება, რომელიც ჩვეულებრივ კორდინატთა სისტემაში ექსპონენციალურ სახეს ატარებს და ტემპერატურის გაზრდით წინაღობა მცირდება. ეს გამოწვეულია იმით, რომ ნახევრადგამტარულ მასალებში ტემპერატურის გაზრდით დენის მატარებლების რიცხვი ექსპონენციალურად იზრდება ე.ი. წინაღობა ამავე კანონით მცირდება.

თუ ამ დამოკიდებულებას ლოგარითმულ კოორდინატთა სისტემაში განვიხილავთ აღმოჩნდება, რომ თერმისტორის ან ბოლომეტრის წინაღობის სიდიდის ლოგარითმის მნიშვნელობა ტემპერატურის გაზრდით სწორხაზოვნად მცირდება (ნახ. №5). ეს მოვლენა ინფრაწითელი სხივის აღრიცხვის მოწყობილობების შესაქმნელად გამოიყენება [5].



ნახ. №5 თერმისტორის ტემპერატურული მახასიათებელი

ასეთ ხელსაწყოებს შემდეგი მახასიათებლები გააჩნიათ.

1. მგრძობიარობა. ანუ ტემპერატურის 1° -ით ცვლილებისას წინაღობის ცვლილება, ეს იგივეა რაც წინაღობის ტემპერატურული კოეფიციენტი, რომელიც შემდეგი ფორმულით გამოითვლება [6].

$$R_T = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_T - R_0}{T - T_0} \quad (1)$$

თუ ნახაზი №5-ზე მოყვანილ მონაცემებს გამოვიყენებთ, მაშინ $R_0 = 5 \cdot 10^4$ ომი, $R_t = 1$ ომი, $T = 570^\circ$ ხოლო $T_0 = 270^\circ$ ე.ი.

$$R_T = \frac{1}{10^4} \cdot \frac{-10^4}{300} \cdot \frac{1}{K} = -0,003 \frac{1}{K} \quad (2)$$

როგორც ვხედავთ თერმისტორის წინაღობის ტემპერატურული კოეფიციენტი უარყოფითია და ტემპერატურის 1 კელვინით გაზრდისას

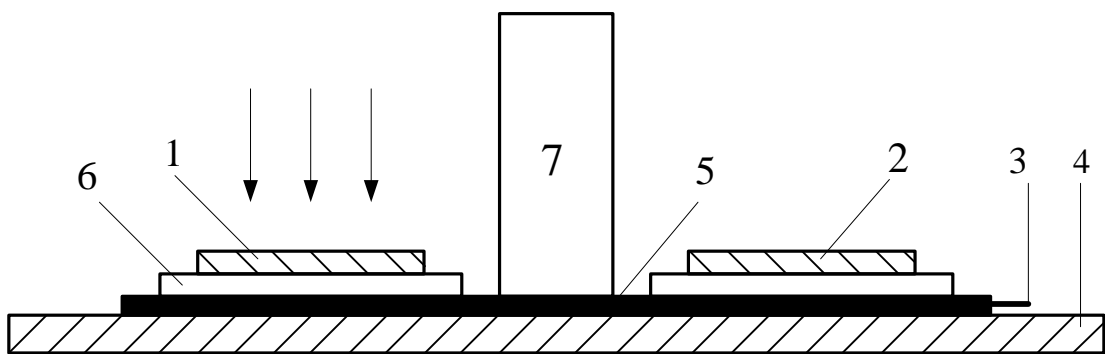
მისი წინაღობა 0,3-ით მცირდება. თუ გავითვალისწინებთ, რომ წინაღობის (ან დენის) სიდიდის თანამედროვე გამზომი ხელსაწყოები მახასიათებლის 0,01%-ით ცვლილებას აღიქვამენ, მაშინ შესაძლებელია ისეთი თერმისტორები (ბოლომეტრები) დამზადდეს რომელთა მგრძობიარობა ტემპერატურის მიხედვით 0,003 °C შეადგენს. მაგრამ თუ გავითვალისწინებთ შესრულების სირთულეს მაშინ ეს სიდიდე 0,03 °C შეადგენს. რაც ტექნიკის თანამედროვე მოთხოვნებს სრულებით აკმაყოფილებს.

2. თერმისტორის დროის მუდმივა, ეს ის დროა რომლის განმავლობაში თერმისტორის ტემპერატურა 63%-ით (e-ჯერ) იცვლება ტემპერატურის 100 °C -ით ცვლილებისას. ეს ნიშნავს, რომ თუ თერმისტორს 120 °C ტემპერატურის გარემოდან 20 °C მქონე გარემოში გადავიტანთ, მაშინ რა დროის განმავლობაში მისი ტემპერატურა 63 °C-ით შემცირდება. თანამედროვე თხელფენიანი თერმისტორებისთვის ეს დრო 0,04-წამიდან 14 წამამდე იცვლება.

3. თერმისტორის მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურა. ეს ის მაქსიმალური ტემპერატურაა, რომლის მოქმედებითაც თერმისტორის ნახევრადგამტარის თხელ ფენაში ადგილი არ აქვს ნახევრადგამტარის ფენის ელექტროტბურ გარღვევას. სხვადასხვა ტიპის ნახევრადგამტარული მასალისთვის ეს ტემპერატურა 250 °C-დან 1300 °C-მდე იცვლება. შესაბამისად ანსხვავენ თერმისტორებს დაბალტემპერატურულს მუშა ტემპერატურით 250 °C-მდე, საშუალო ტემპერატურულს 550 °C და მაღალტემპერატურულს > 550 °C. ამასთანავე ინფრაწითელი სხივის ხელსაწყოებს გააჩნიათ სპეციალური დამცავი ფენა მაღალი ტემპერატურის მოქმედებით დაზიანებისაგან დასაცავად.

4. მაქსიმალური დასაშვები სიმძლავრე. ეს ის თბური ენერჯიაა რომელსაც თერმისტორი იღებს ინფრაწითელი სხივის ზემოქმედებით და მასში გამავალი დენით გამოყოფილი სითბოს სახით. ამ ენერჯიის შესამცირებლად თერმისტორებს ზოგჯერ გამცივებელ მოწყობილობას ან დამცავ ფენას უკეთებენ.

5. თერმისტორის ენერგეტიკული მგრძობიარობის კოეფიციენტი გვიჩვენებს თუ რა სიმძლავრეა საჭირო, რომ თერმისტორის წინაღობის სიდიდე 1%-ით შეიცვალოს. რაც მცირეა მისი მნიშვნელობა მით მგრძობიარეა თერმისტორი. მაღალი მგრძობიარობით გამოირჩევიან დაბალტემპერატურული თერმისტორები. იმისათვის, რომ გამოირიცხოს გარემოს ტემპერატურის გავლენა თერმისტორის წინაღობის სიდიდეზე აუცილებელია გარემოს ტემპერატურის ცვლილების კონპენსაცია, ამისთვის ორ თერმისტორს ერთნაირ გარემოში ათავსებენ. ერთი გამზომს წარმოადგენს, ხოლო მეორე მაკომპენსირებელს (ნახ. №6). თერმისტორთა ასეთ კომბინაციას ბოლოტომეტრს უწოდებენ.



ნახ. №6 ბოლოტომეტრის სქემა

ელექტროსაიზოლაციო მასალის ზედაპირზე (4) ვერცხლის თხელ გამტარ ფენაზე (5) დაფენილია ნახევრადგამტარის ერთმანეთისგან იზოლირებული (7) ორი ფენა (6). რომლებსაც ინფრაწითელი სხივებისადმი გამჭვირვალე მეტალის ელექტროდები (1 და 2 შესაბამისი გამომყვანებით) გააჩნია. ერთ-ერთი მათგანი, რომელიც მაკომპენსირებელ თერმისტორს წარმოადგენს დაცულია ინფრაწითელი სხივების ზემოქმედებისაგან და მისგან გამომავალი სიგნალი, რომელიც 2 და 3 გამომყვანს შორის წარმოიქმნება მხოლოდ გარემოს ტემპერატურის ცვლილებით იცვლება და ხელსაწყოს გარემოს კომპენსაციის სქემას მიეწოდება, ხოლო მეორე გამზომ თერმისტორზე ინფრაწითელი სხივით წარმოქმნილი სიგნალი 1 და 3 ელექტროდს შორის აღიძვრება და მას გამზომ ბოლოტომეტრს უწოდებენ. ეს სიგნალი გაზომვის სქემას მიეწოდება.

ამდგაგარად ინფრაწითელი სხივის ხელსაწყოებს რომელიც ერთი ბოლოტომეტრისგან მაინც შედგება მინიმუმ სამი ელექტროდი გააჩნია.

1.4 ინფრაწითელი სხივების ხელსაწყოების გამოყენება

ინფრაწითელი სხივის ხელსაწყოები ფართოდ გამოიყენება ტექნიკაში, მედიცინაში, სამხედრო და სახალხო მეურნეობის სხვა დარგებში.

ყველა ეს ხელსაწყო დაფუძნებულია ადამიანის თვალისადმი შეუგრძნობელი ინფრაწითელი სხივების აღმოჩენაზე, მისი ინტენსივობის გაზომვაზე, სითბური ველი განაწილების სურათის ადამიანის თვალისადმი აღქმად სპექტრში გარდაქმნაზე და შესაბამისად გამოსახულების მიღებაზე. თანამედროვე კომპიუტერული ტექნიკა საშუალებას იძლევა გამოსახულების ნებისმიერ წერტილზე (პიქსელზე) განვსაზღვროთ სხეულის ტემპერატურა. ეს კი „ცხელი წერტილის“ აღმოჩენის საუკეთესო საშუალებაა.

ზოგიერთ შემთხვევაში ინფრაწითელი გამოსხივების წყაროების საშუალებით (ინფრაწითელი სხივის ღაზური) ობიექტს სპეციალურად აშუქებენ, ამასთან ერთად მას ინფრაწითელი სხივის კამერით აკვირდებიან. ეს საშუალებას იძლევა არამარტო დეფექტები გამოვაკლინოთ, არამედ ადამიანის თვალისთვის შეუმჩნეველი ობიექტი გახდეს ხილული. ამ სახის ხელსაწყოები ძირითადად სამხედრო დანიშნულების ან თბურ მიკროსკოპიაში გამოიყენება. [11]. სამხედრო საქმეში ინფრაწითელი სხივის ხელსაწყოები გამოიყენება ღამის მხედველობის ხელსაწყოების, თბური პელენგატორების, ინფრაწითელი სხივით დამიზნების ხელსაწყოების და სხვა მრავალი მოწყობილობების შესაქმნელად.

გამოსხივების სპექტრის ინფრაწითელ დიაპაზონში შესწავლა საშუალებას იძლევა ნივთიერებაში ან გარემოში ისეთი მინარევები აღმოვაჩინოთ, რომლის გამოვლენა ჩვეულებრივი ქიმიური ანალიზით ან სხვა მეთოდებით შეუძლებელია. ამ მეთოდს ინფრაწითელი სხივის სპექტროსკოპიას უწოდებენ.

ტემპერატურის მოქმედებით დეტალების სტრუქტურის ცვლილებას ან დეფორმაციას დიდი მნიშვნელობა აქვს ავიაციაში. ამის გამო რაკეტის ან თვითმფრინავის ზედაპირს ინფრაწითელი სხივებით ათბობენ და შემდეგ ამ ზედაპირის გამოსხივების სპექტრის შესწავლით დეფექტებს გამოავლენენ [12].

ელექტროტექნიკური მოწყობილობის სითბოგადაცემის და სითბოს განაწილების სურათის შესწავლის მიზნით ელექტროტექნიკური მოწყობილობის გრაფილში სანამ მას ავზში მოათავსებენ დენს გაატარებენ და გამოიწვევენ მის გათბობას (70 – 90 °C-მდე) ისე, რომ ტემპერატურა დასაშვებს არ აღემატებოდეს და შემდეგ ხდება სითბოს განაწილების და გარემოზე გადაცემის სურათის შესწავლა. ამ მეთოდით გამოვლინდება ის უბნები სადაც სითბოს ინტენსიური გამოყოფა ხდება ან გარემოს სითბო ცუდად გადაეცემა. ასეთი გამოკვლევის ჩატარება როდესაც ტრანსფორმატორის გრაფილი ავზშია მოთავსებული პრაქტიკულად შეუძლებელია [13].

დიდი სიმძლავრის ძრავებს ან გენერატორებს ნორმაზე მეტად დატვირთავენ და გამოყოფილი სითბოს გარემოზე გადაცემის პროცეს მისი ზედაპირის ან შუბლურ ნაწილში ტემპერატურის განაწილების სურათის ცვლილებით იკვლევენ [14].

ამომრთველების ან გამთიშველების კონტაქტების მდგომარეობის შეფასების მიზნით მათში 1,5-ჯერ მეტი სიდიდის დენს ატარებენ და როდესაც კონტაქტის ტემპერატურა მაქსიმალურ სადაშვებს მნიშვნელობას მიაღწევს დენის სიდიდეს ნომინალურამდე ამცირებენ და კონტაქტის მთელ ზედაპირზე სითბოს განაწილების ერთგვაროვნებას იკვლევენ, რათქმაუნდა სითბოს გადაცემას და კონვექციასაც ითვალისწინებენ. ამით კონტაქტის ექსპლუატაციაში შეყვანამდე გამოკვლევა ხდება. ეს მეთოდი ძვირადღირებულია, მაგრამ ზემოაღნიშნული ძაბვის მოწყობილობების გამოკვლევის მიზნით აუცილებელია და ფართოდ გამოიყენება ამ სახის მოწყობილობების წარმოებაში [15].

ელექტრომოწყობილობაში გამოყენებული მყარი საიზოლაციო მასალები როგორცაა ელექტროტექნიკური ქაღალდი და მუყაო, შედარებით დაბალი სითბომედეგობით და სითბოგამტარობით ხასიათდება ვიდრე მოწყობილობის აქტიური ნაწილის შესაქმნელად

გამოყენებული მეტალის დეტალები. ამისგამო მათში სითბოს გამოყოფა (დიელექტრიკული დანაკარგების სახით) და გარემოზე გადაცემა მეტად აქტუალურია. ამ მოვლენის შესწავლის და ამ მასალებით შექმნილი საიზოლაციო კონსტრუქციის დეფექტების გამოვლენის მიზნით მათ ზედაპირზე სითბური ველის სურათის შესწავლას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება. ეს მეთოდი ძირითადად საზღვარგარეთის საწარმოებში გამოიყენება და აუცილებელ მეთოდად ითვლება [16, 17].

მაღალი ძაბვის მზომი ტრანსფორმატორების ავზი კერამიკის იზოლატორს წარმოადგენს. მათში ტრანსფორმატორის ზეთი მხოლოდ ბუნებრივი კონვექციის საშუალებით მოძრაობს და სითბო გარემოს ძირითადად ავზის ზედა ნაწილებიდან გადაეცემა. რადგან კერამიკა მეტალთან შედარებით ცუდი სითბოგადაცემით ხასიათდება. ამიტომ აუცილებელია ახლად შექმნილი კონსტრუქციის სითბოგადაცემა შემოწმდეს. ადრე ამ შემოწმებას ზედაპირზე განლაგებული რამოდენიმე ასეული თერმოწყვილის საშუალებით ახდენდნენ. დღეისათვის კი ამ მიზნით ინფრაწითელი სხივის კამერები გამოიყენება [18].

1.5 თბოვიზორული კამერები და მათი გამოყენება ენერგეტიკაში

თბოვიზორი წარმოადგენს ხელსაწყოს, რომელიც იღებს თბურ გამოსახულებას ინფრაწითელი სხივის სპექტრში გამოსაკვლევ ობიექტზე პირდაპირი კონტაქტის გარეშე და მას სპეციალური მოწყობილობის საშუალებით ეკრანზე ხილულ სპექტრში აღბეჭდავს.

თბოვიზორის პირველი ნიმუში რომელიც სერ ვილიამ ჰერშელის შვილმა სერ ჯორჯ ჰერშელმა 1840 წელს დაამზადა ევაპორაციი ეწოდებოდა. გამოსახულების ფორმირება ხდებოდა მუქი მინის ფირფიტაზე, რომელიც ადვილად აორთქლებადი სითხის – წყლის ან ზეთის თხელი ფენით იყო დაფარული. როდესაც ასეთ ზედაპირს ობიექტიდან წამოსული ინფრაწითელი სხივები ეცემა, ის ადგილები, რომლებსაც მეტი სხივები ანათებს სითხე მეტად ორთქლდება და

მინაზე ობიექტის გამოსახულება წარმოიქმნება. ასეთი გამოსახულების მდგრადობა ეკრანზე მცირეა და კონტრასტიც ნაკლები აქვს.

1880 წელს ასტრონომმა სემუელ ლენგლიმ გამოსახულების მისაღებად ბოლოტომეტრების სისტემა გამოიყენა და თანამედროვე თბოვიზორის წინამორბედი ხელსაწყო შექმნა, რომელიც 300 მეტრ მანძილზე ცოცხალი არსების ტემპერატურას გრძნობდა, მაგრამ გამოსახულების ხარისხი უფრო ნაკლები ქონდა ვიდრე ევაპოგრაფს. ის ინფრაწითელი სხივებით ბოლოტომეტრის წინაღობის ცვლილებას აღიქვამდა და უფრო მეტად ობიექტის აღმოსაჩენად იყო გამოსადეგი ვიდრე გამოსახულების მისაღებად. ლენგლის ამ მოწყობილობამ თითქმის 100 წლის განმავლობაში ცვლილება არ განიცადა, რადგან ინფრაწითელი გამოსახულების ხილულ სპექტრში გარდაქმნა გაძნელებული იყო.

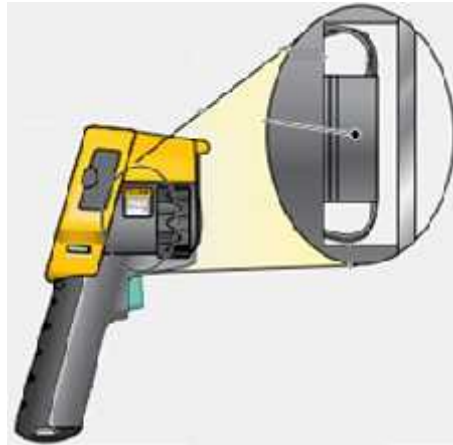
ამ პრობლემის გადაჭრას მიკროელექტრონიკის განვითარებამ და ახალი ნახევარგამტარული მასალების შექმნამ შეუწყო ხელი. ამასთანავე ამ ტიპის ხელსაწყოების განვითარებაში დიდი როლი შეიტანა სამხედრო დანიშნულებით მათმა გამოყენებამ. გასული საუკუნის ბოლომდე თბოვიზორების ძირითადი მომხმარებლები სამხედროები იყვნენ.

არასამხედრო დანიშნულების თბოვიზორებში ინფრაწითელი სხივის მიმღებს სპეციალურ კაფსულაში მოთავსებული შეკუმშული ან გათხევადებული აირი წარმოადგენდა. ასეთი სისტემა სპეციალური გამაცივებელ მოწყობილობას ან თხევადი აზოტით გაცივებას მოითხოვდა. ის კი თბოვიზორების გამოყენების ეფექტურობას მნიშვნელოვნად ამცირებდა.

გასული საუკუნის 80-იანი წლების ბოლოს შეერთებულ შტატებში და ევროპაში სამხედროებმა საყოფაცხოვრებო დანიშნულებისთვის შესაძლებელი გახადეს ინფრაწითელი გამოსახულების მატრიცული მიმღები, რასაც მანამდე საიდუმლოდ ინახავდნენ.

გამოსახულების მატრიცული მიმღები (FPA) მოთავსებულია ლინზების ფოკალურ სიბრტყეში და შედგება მართკუთხა ფორმის ინფრაწითელი სხივის მიმღები ელემენტებისაგან. ინფრაწითელი სხივის

მოქმედებით ცალკეული ელემენტი ან წინაღობას იცვლის ან მასზე მცირე სიდიდის ელექტრული სიგნალი აღიქვრება. ერთ-ერთი ასეთი ელემენტის გადიდებული ფრაგმენტი ნახ. №7-ზეა ნაჩვენები. გამოსახულების ამ უმცირეს ნაწილს პიქსელს უწოდებენ.



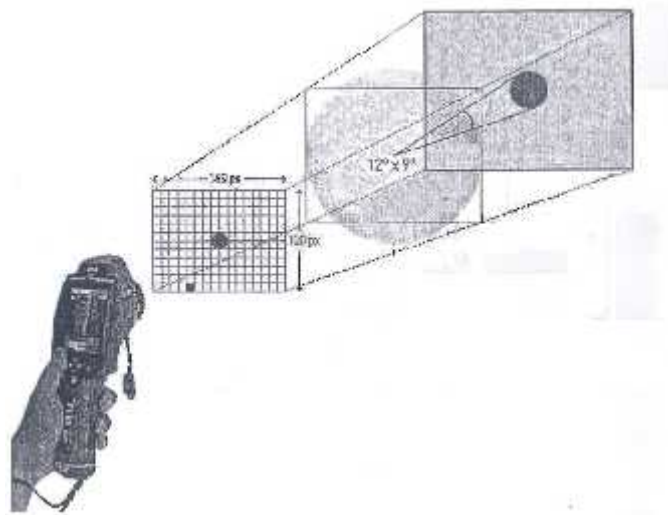
ნახ. №7 მატრიცის ელემენტი

თბოვიზორებში მატრიცული ელემენტების გამოყენებამ მისი ზომები გაცილებით შეამცირა და გამოსახულების ხარისხი მნიშვნელოვნად გააუმჯობესა.

თანამედროვე თბოვიზორების ინფრაწითელი გამოსხივების მიმღები მატრიცის ზომები 16X16-დან 640X480 პიქსელამდე იცვლება. ხოლო სპეციალური დანიშნულების მატრიცის 1200X1000 პიქსელს აღემატება. პირველი რიცხვი ვერტიკალურ სვეტს, ხოლო მეორე ჰორიზონტალური ხაზების იმ რაოდენობას მიგვითითებს რომელიც დისპლეიზე (ეკრანზე) გამოისახება. მაგალითად მატრიცა ზომებით 160X120 პიქსელი დისპლეიზე 19200 პიქსელით გამოისახება. რაც მეტია ფართის ერთეულზე პიქსელების რიცხვი მით მეტად მკაფიოა გამოსახულება, მაგრამ მით მეტ მაღალი მგრძობიარობის მქონე ელემენტს მოითხოვს. ასეთი ელემენტების მქონე მატრიცის დამზადება რთულ ტექნოლოგიას მოითხოვს. რაც თბოვიზორული მოწყობილობების ღირებულებას განაპირობებს. ნანოტექნოლოგიის განვითარებამ და თანამედროვე პროგრამულმა უზრუნველყოფამ მნიშვნელოვნად

შეამცირა მატრიცის ღირებულება და გააუმჯობესა გამოსახულების ხარისხი [19].

მატრიცის ელემენტების ინფრაწითელი სხივის მიმართ მგრძობიარობა საკმაოდ მაღალია და დღეისათვის $0,005\text{ }^{\circ}\text{C}$ შეადგენს, რათქმაუნდა არსებობს უფრო მაღალი მგრძობიარობის ($< 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$) თბოვიზორები, მაგრამ ისინი სპეციალური დანიშნულების და ძვირადღირებულები არიან.



ნახ. №8 თბოვიზორით გამოსახულების ფორმირება

ობიექტიდან წამოსულ ინფრაწითელ სხივებს თბოვიზორის ოპტიკური სისტემა აფოკუსირებს ფოკალურ სიბრტყეში განლაგებულ მიმღებ მატრიცაზე (ნახ. №8), რომლის ცალკეული ელემენტი (პიქსელი) გასცემს ელექტრულ სიგნალს, ან მასზე ინფრაწითელი სხივების მოქმედებით აღძრული პოტენციალის სახით (ფოტოეფექტის ანალოგი) ან მისი წინააღობის ცვლილებით (ფოტოწინააღობის ანალოგი).

წარმოქმნილ სიგნალს თბოვიზორის ელექტრონული მოწყობილობა აღიქვამს და შესაბამის ფერებში ეკრანზე თერმოგრამის სახით წარმოაჩენს.

თერმოგრამა ეს გამოსაკვლევი ობიექტის გამოსახულებაა, რომელიც პროგრამულად დამუშავებულია და ობიექტს სხვადასხვა ინტენსივობის ინფრაწითელ გამოსხივებას პროგრამულად გრადირებული (დაყოფილი) ადამიანის თვალისადმი მგრძობიარე

სპექტრში წარმოადგენს. ეს სპექტრი ძირითადად სხვადასხვა სიმკვეთრის წითელი ფერია, რადგან ის ტემპერატურასთან კარგად ასოცირდება.

იმისათვის, რომ ინფრაწითელი სპექტრის გამოსახულება ხილულ გამოსახულებას კარგად შეუთავსდეს თბოვიზორები აღჭურვილია ინფრაწითელი თვალით და ხილული სპექტრის მიმღები კამერებით, რაც თბოვიზორის გამოყენების ეფექტურობას ზრდის.

თბოვიზორების მახსოვრობის ელემენტებით აღჭურვა რამოდენიმე ასეული ობიექტის გამოსახულების შენახვის და მისი შემდგომი დამუშავების საშუალებას იძლევა. რაც ერთი სამუშაო დღის განმავლობაში უწყვეტ მუშაობას უზრუნველყოფს.

ენერგოსისტემებში თბოვიზორების გამოყენებამ უკანასკნელი ათი წლის განმავლობაში დიდი პროგრეს მიაღწია და დღეისათვის ის დაუზიანებელი დიაგნოსტიკის ერთ-ერთ შეუცვლელ მეთოდად ითვლება. შეიქმნა მრავალი მეთოდური მითითებები და სახელმძღვანელო ნორმატიული დოკუმენტები [20].

1.6. თავი 1-ის მიმართ დასკვნები

1. ნებისმიერი სხეულის ტემპერატურა თუ $0^{\circ}K$ აღემატება, მაშინ მას გააჩნია ამ ტემპერატურის შესაბამისი გამოსხივება ინფრაწითელ სპექტრში. რომლის ინტენსივობის გაზომვით შესაძლებელია სხეულის ტემპერატურის დადგენა.

2. ინფრაწითელი სხივის გავრცელებას ატმოსფეროში თანახლავს მისი შთანთქმა ატმოსფეროში არსებული წყლის ორთქლის, ნახშირორჟანგის და მტვრის ნაწილაკების მიერ. ყველაზე მეტად დაცულია შთანთქმისაგან (შესუსტებისგან) ინფრაწითელი სხივები, რომლის ტალღის სიგრძე 8 მიკრონიდან 15 მიკრონამდეა.

3. ენერგეტიკაში გამოყენებული თბოვიზორების მუშაობის ტალღის სიგრძე 6 მიკრონიდან 15 მიკრონამდეა და მათი ტემპერატურისადმი მგრძობიარობა $0,05^{\circ}C$ არ აღემატება.

4. ინფრაწითელი სხივის მიმღები მატრიცული ელემენტების გამოყენებამ მნიშვნელოვნად გააუმჯობესა გამოსახულების ხარისხი, შეამცირა თბოვიზორების წონა და ღირებულება.

5. ბოლო წლების გამოცდილებით შეიძლება ითქვას, რომ ენერგეტიკული ობიექტების თბოვიზორული გამოკვლევა მნიშვნელოვანი პროგრესია ენერგეტიკული ობიექტების წინასწარი პროფილაქტიკური დიაგნოსტიკის, ზრდის მათი მუშაობის საიმედობას და ესქპლუატაციის ხანგრძლივობას.

თავი 2. ელექტროტექნიკური მოწყობილობების დეფექტების აღმოჩენის ელექტრული მეთოდები

ელექტროტექნიკური მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევით იმ დეფექტების აღმოჩენა შეიძლება, რომლებიც ელექტრული მახასიათებლების ცვლილებას და სითბოს გამოყოფას იწვევენ. ეს დეფექტები როგორც წესი წერტილოვანი ან მცირე ზომის არიან. მაგრამ თუ დეფექტი მთელ მოცულობაშია განაწილებული მაგალითად საიზოლაციო სისტემის დიელექტრიკული დანაკარგების ნორმაზე მეტად გაზრდა ან წინააღობის შემცირება, მაშინ მისი გამოვლენა მხოლოდ ელექტრული გაზომვებით შეიძლება და თბოვიზორული გამოკვლევით ის არ გამოჩნდება [7].

ელექტრული გაზომვებით კი ისეთი დეფექტების გამოვლენა რომელიც ზეთის მოძრაობასთან ან სითბოს გადაცემის დეფექტებთან არიან დაკავშირებული პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამიტომ ელექტრული მეთოდებით და თბოვიზორული გამოკვლევებით ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში დეფექტების გამოვლენა ურთიერთ შემავსებელი მეთოდებია და ელექტროტექნიკური მოწყობილობების შესახებ სრულ ინფორმაციას იძლევა.

ელექტრული გაზომვების ჩატარებისას აუცილებელია მოწყობილობის ექსპლუატაციის შეწყვეტა ქსელიდან გამორთვა, საღებების მოხსნა, რაც თბოვიზორული გამოკვლევისთვის საჭირო არ არის, მაგრამ თბოვიზორული გამოკვლევით გამოვლენილი დეფექტების არსებობის დასადასტურებლად ელექტრული გაზომვების ჩატარება აუცილებელია

2.1 საიზოლაციო სისტემის მახასიათებლების ელექტრული გაზომვა

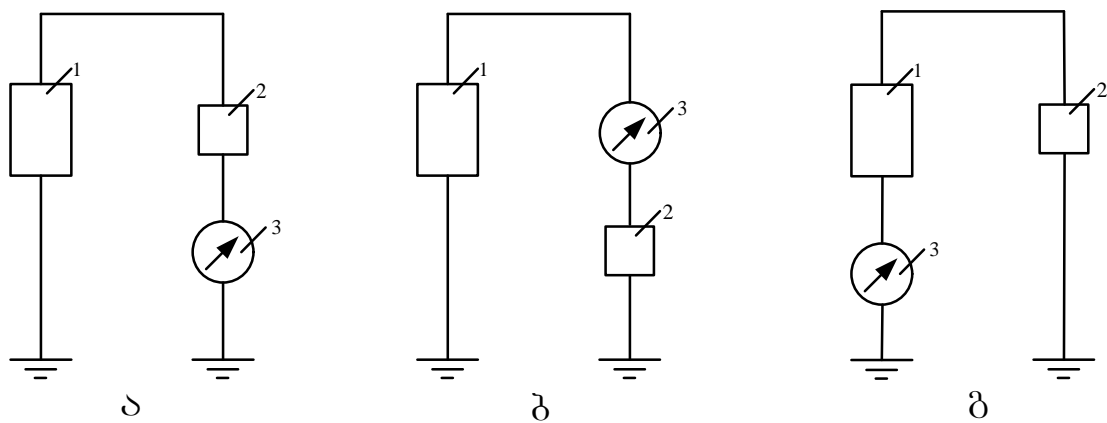
ელექტროტექნიკური მოწყობილობების საიზოლაციო სისტემა გარე იზოლაციის (ძაბვის შემყვანების ფაიფური, ჰაერი) და იზოლაციის შიგა ნაწილისგან შედგება. ეს უკანასკნელი კი თავის მხრივ თხევადი

(სატრანსფორმატორო ზეთი) და მყარი (ძირითადად ელექტროტექნიკური ქაღალდი და მუყაოს) საიზოლაციო მასალების ერთობლიობას წარმოადგენს.

საიზოლაციო სისტემაში წარმოქმნილი დეფექტი მთელი ელექტროტექნიკური მოწყობილობის საიმედო მუშაობის შემცირებას განაპირობებს და დეფექტის განვითარების შემთხვევაში ის ავარიაში გადაიზრდება.

საიზოლაციო სისტემის მახასიათებლების ელექტრული გაზომვის სქემის სახეები და შესრულება რეალურ პირობებში დამოკიდებულია გასაზომ ობიექტთან ელექტრულ კავშირის დამყარების შესაძლებლობაზე.

ცნობილია, რომ ნებისმიერი სახის ელექტრული გაზომვა, რომ მოვახდინოთ გასაზომ ობიექტზე უნდა ვიმოქმედოთ გარკვეული სიდიდის ძაბვით და გავზომოთ ამ ობიექტში გამავალი დენის სიდიდე. ე.ი. გასაზომი ობიექტი ჩავრთოთ ელექტრულ წრედში. ამ მიზნით აუცილებელია ობიექტთან ელექტრული კავშირი ორ სხვადასხვა მხარეს დავამყაროთ.



ნახ. №9 ელექტრული გაზომვის შესაძლებელი სქემები

- 1 - ძაბვის წყარო;
- 2 - გასაზომი ობიექტი;
- 3 - გამზომი ხელსაწყო;

ნებისმიერი ელექტრული გაზომვის სქემა (ნახ. №9) ყოველთვის შეიცავს ძაბვის წყაროს 1, გასაზომ ობიექტს 2 და გამზომ ხელსაწყოს 3.

ამ კომპონენტების ურთიერთგანლაგების მიხედვით ანსხვავებენ გაზომვის პირდაპირ სქემას ა), გადაბრუნებული სქემის ბ) და უკუმიმდევრობით სქემას გ). იმის მიხედვით თუ რა მდგომარეობაშია გასაზომი ობიექტი, მისი ერთი გამომყვანი დამიწებულია თუ არა, ან ორივე თავისუფალია, ელექტრული გაზომვის სხვადასხვა სქემას იყენებენ.

პირდაპირი სქემა (ა) გამოიყენება როდესაც გასაზომი ობიექტის ორივე მომჭერი ან ელექტროდი თავისუფალია და შესაძლებელია ელექტრული კავშირის დამყარება. ამ შემთხვევაში მისი წყაროს 1, რომლის ერთი ბოლო დამიწებულია, ხოლო მეორე ბოლო სპეციალური კაბელებით დაკავშირებულია გასაზომ ობიექტთან 2, რომელიც უკავშირდება გამზომ ხელსაწყოს 3. ასეთი სქემა გამოირჩევა დიდი სიზუსტით და ითვლება კლასიკურ სქემად [8].

გადაბრუნებული სქემა (ბ) გამოიყენება იმ შემთხვევაში როდესაც ობიექტის ერთი ელექტროდი თავისუფალია და მეორე დამიწებულია. ამ შემთხვევაში ძაბვის წყარო 1 რომლის ერთი გამომყვანი დამიწებულია უკავშირდება გამზომ ხელსაწყოს 3, რომელიც დაკავშირებულია გასაზომი ობიექტის თავისუფალ ელექტროდთან, ეს სქემა საიზოლაციო სისტემის გაზომვაში ხშირად გამოიყენება, მაგრამ მას გააჩნია მთელი რიგი უარყოფითი მხარეები. გამზომი ხელსაწყო უშუალოდ იმყოფება მაღალი ძაბვის ქვეშ, ამის გამო ასეთ პირობებში მუშაობა მოითხოვს გარკვეული წესების დაცვას. აგრეთვე გამზომ ხელსაწყოებში გვხვდება უფრო მეტი პარაზიტული დენები ვიდრე წინა სქემებში.

უკუმიმდევრობის სქემა (გ) ანალოგიურია პირდაპირი სქემის ამიტომ გამზომი ხელსაწყო ჩართულია მაღალი ძაბვის დამიწების სქემაში. გამოირჩევა ნაკლები სიზუსტით, საშიშია მასთან მუშაობა და იშვიათად გამოიყენება.

ნებისმიერი გაზომვის სქემა რომელიც დაკავშირებულია მაღალ ძაბვასთან დიდი წინააღმდეგობის გაზომვასთან, სხვადასხვა ზემოქმედებას განიცდის. ასეთია ელექტრული და მაგნიტური ველები.

ისინი აღძრავენ პარაზიტულ დენებს. აგრეთვე გაზომვის სქემაში წარმოიქმნება დამატებით წრედი, რომლებიც პარაზიტულ დენებს წარმოქმნიან და ზრდიან ცდომილებებს. ამ მხრივ ყველაზე დაცულია პირდაპირი გაზომვის სქემა [9].

უკუმიმდევრობის სქემა გამოიყენება იმ შემთხვევაში როდესაც გასაზომი ობიექტი და ძაბვის წყარო ერთმანეთთან დაკავშირებულია, ხოლო გამზომი ხელსაწყო მოხერხებულია ჩავრთოთ ძაბვის წყაროს დამიწების წრედში, ამ დროს პარაზიტული წინააღმდეგობები წარმოიქმნება.

ძალოვანი ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემა, როგორც კომპონენტების, ასევე ცალკეული დეტალების ურთიერთ დაკავშირებულ რთულ სისტემას წარმოადგენს. მასში გარკვეული კანონზომიერებით ერთმანეთს ენაცვლება მყარი და თხევადი დიელექტრიკი. მყარი დიელექტრიკი ძირითადად წარმოდგენილია ელექტრო ტექნიკური ქაღალდის ან მუყაოს სახით. ხოლო თხევად დიელექტრიკს ტრანსფორმატორის ზეთი წარმოადგენს. ამ სამი კომპონენტის ურთიერთ განლაგება გვაძლევს ქაღალდ-ზეთიან და ზეთ-ბარიერულ საიზოლაციო სისტემას [7].

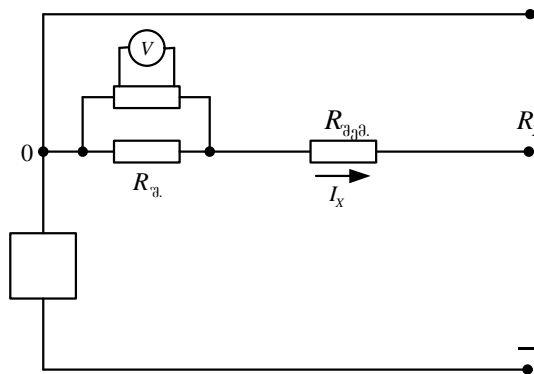
საიზოლაციო სისტემაში ცალკეული კომპონენტის რაიმე საშუალებით გამოყოფა ან მისი მახასიათებლების შეფასება პრაქტიკულად შეუძლებელია და გაზომვებისას მთლიან სისტემის ელექტრულ მახასიათებლებს ვზომავთ.

$R_{0\Omega}$ -ის ითვალისწინებს ცალკეულ კომპონენტებს კუთრ მოცულობით და ზედაპირულ წინააღმდეგობას და აქ შეუძლებელია რომელიმე მათგანის გამოყოფა. რადგან მუდმივი ძაბვის მოქმედებით პოლარიზაციის დენი თანდათან მცირდება და ამ შემცირების ხასიათზე გავლენას ახდენს იზოლაციის მდგომარეობა. ამიტომ საერთაშორისო ელექტრული კომისიის რეკომენდაციით მიღებულია განისაზღვროს საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობა ძაბვის მოწოდების დაწყებიდან 15 წამის შემდეგ. მას R_{15} აღნიშნავენ: ძირითად გამოსავალ კრიტერიუმს R_{60} წარმოადგენს და მას იზოლაციის წინააღმდეგობას მუდმივი დენის მიმართ უწოდებენ. იზოლაციის მდგომარეობის შესაფასებლად,

შემოყავთ კოეფიციენტი $K = \frac{R_{60}}{R_{15}}$ და მას აბსორციის კოეფიციენტს უწოდებენ. თუ იზოლაცია მშრალია ან ნაკლები რაოდენობის ტენს შეიცავს, მაშინ პოლარიზაციის პროცესი სწრაფად დამყარდება და $K \geq 1.3$.

ცნობილია, რომ ძალოვანი ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის წინააღმდეგობა ელექტრული ველის მცირე დაძაბულობის შემთხვევაში სუსტად არის დამოკიდებული ველის დაძაბულობაზე. ამიტომ გადაწყდა, რომ გაზომვები ჩაატარონ გარკვეული ძაბვის სიდიდეზე რომელიც რა თქმა უნდა ნორმალურ ძაბვაზე ნაკლებია. ამ მიზნით შეიქმნა სხვადასხვა სახის ხელსაწყოები, რომლებიც დიდი წინააღმდეგობის გასაზომად გამოიყენებიან და მეგაომეტრებს უწოდებენ.

მეგაომეტრი ელექტრულ ხელსაწყოს წარმოადგენს, რომელიც იზოლაციის წინააღმდეგობის გასაზომად გამოიყენება. თანამედროვე მეგაომეტრებს დიდი წინააღმდეგობის გაზომვა შეუძლიათ $10^9 \div 10^{10}$ ომი. ამის გამო მისი გაზომვის დიაპაზონი დაყოფილია სხვადასხვა საფეხურებად. მიუხედავად ამისა ერთ საფეხურს უწევს საკმაოდ დიდ დიაპაზონში მუშაობა და გამზომი ხელსაწყო სკალა დიდი რომ არ გამოვიდეს მას მიმდევრობით ჩართული აქვს მალოგარიტმებელი ელემენტი (კერძოდ დიოდი) რის გამოც სკალა არაწრფივია. ამის გარდა იზოლაციის წინააღმდეგობა შეიძლება ძალიან მცირე ან დიდი იყოს, იმისთვის, რომ დაუცვათ ხელსაწყო მცირე დროითი დიდი დენების ზემოქმედებისგან მას მიმდევრობით ჩართული აქვს დენის შემზღუდი წინააღმდეგობა $R_{გვ.}$ (ნახ. №10)



ნახ. №10 მეგაომეტრის გამარტივებული ელექტრული სქემა

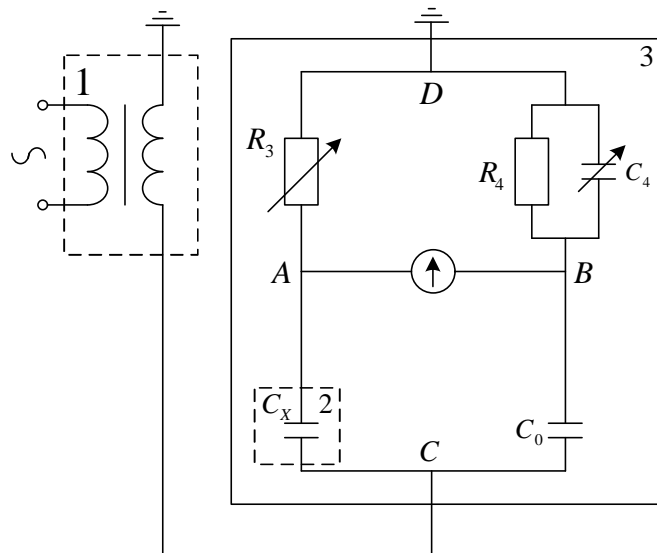
მეგაომმეტრი შედგება ძაბვის წყაროსაგან, რომელიც გაზომვის სქემას აწვდის მუდმივ გამართულ U ძაბვას, რომლის სიდიდე შეიძლება იყოს 100, 200, 500, 1000, 2500, 5000, 10000 ვოლტი. იმისდამხედვით თუ რა ძაბვაზე მუშაობს გამოსაცდელი მოწყობილობა შეირჩევა შესაბამისი გამოცდის ძაბვა. როგორც წესი წყაროს გამოძავალი მინუსი, რომელიც უკავშირდება მეგაომმეტრის „მინუს“ მომჭერს უმეტეს შემთხვევაში დამიწებულია (პირდაპირი სქემა), ხოლო პლიუსი 0 წერტილში ორ შტოდ იყოფა. ერთი $R_{\text{გაზომვის}}$ -ის საშუალებით R_x მომჭერს უკავშირდება, ხოლო მეორე უკავშირდება ეკრანს. როგორც ვხედავთ R_x და მომჭერებს ერთი და იგივე პოტენციალი აქვს.

ეკრანი საშუალებას გვაძლევს ერთი და იგივე პოტენციალის ზემოქმედების ქვეშ მოვაქციოთ გასაზომი და პარაზიტული წინააღმდეგობა, მაგრამ ეკრანის წრედში გამავალი დენი არ ხვდება გაზომვის წრედში. ამით გაზომვის სიზუსტე იზრდება.

გაზომვისას შემზღული წინააღმდეგობაზე ყოველთვის მოდის გარკვეული სიდიდის ძაბვის ვარდნა, ხოლო ძაბვის $R_{\text{გაზომვის}}$ -ზე უმნიშვნელოა, მაგრამ თუ ეს ორი წინააღმდეგობა ერთმანეთთან სიდიდით ახლოს არიან, მაშინ $R_{\text{გაზომვის}}$ -ზე მეტი ძაბვა მოდის და გაზომვის ცდომილებაც იზრდება. შესაბამისად უნდა მოხდეს ძაბვის კორექტირება, რასაც თანამედროვე მეგაომმეტრები ავტომატურად ასრულებენ.

რადგანაც სხვადასხვა ტიპის მეგაომმეტრებს შემზღული წინააღმდეგობა განსხვავებული სიდიდის აქვს, ამიტომ სხვადასხვა ტიპის მეგეტრებით მიღებული სიდიდეების ერთმანეთთან შედარებისას ეს განსხვავება გათვალისწინებული უნდა იყოს.

საიზოლაციო სისტემის დიელექტრული დანაკარგები და სისტემის ელექტრული ტევადობა ურთიერთდაკავშირებული პარამეტრებია და მათი გაზომვა ცვლადი ძაბვის შერინგის ბოგირის საშუალებით ხდება. რომელიც ოთხი მხარისგან შედგება და ეს მხარეები კრავენ საკვანძო წერტილებს ABCD (ნახ. №11).



ნახ. №11 ცვლადი ძაბვის ბოგირის ელექტრონული გამარტივებული სქემა

A და B წერტილებს შორის ჩართულია წონასწორობის მაჩვენებელი გაღვანომეტრი. თუ როგორია გაზომვის სქემა D და C წერტილები შეიძლება სხვადასხვა პოტენციალის ქვეშ იყოს. AC მხარეში ყოველთვის ჩართულია გასაზომი ტევადობა C_x . CB მხარეში ჩართულია ეტალონური კონდენსატორი, ეტალონური C_0 ტევადობით, რომელსაც პრაქტიკულად დანაკარგები არ გააჩნია და მისი ტევადობა არ არის დამოკიდებული ძაბვაზე და ტემპერატურაზე. AB მხარეში ჩართული R_3 ცვლადი სიდიდის წინააღმდეგობა, ხოლო BD მხარეში ჩართულია R_4 მუდმივი სიდიდის წინააღმდეგობა, რომლის სიდიდე გაზომვის დიაპაზონის მიხედვით შეირჩევა. R_4 -ის პარალელურად ჩართულია C_4 ცვლადი ტევადობა. R_4 -სა და C_4 -ის კომბინაცია გვაძლევს $tg\delta$ -ს მნიშვნელობას, ხოლო R_3 -ის საშუალებით გამოითვლება გასაზომი ობიექტის ტევადობა C_x .

გაზომვის სიზუსტის და დიაპაზონის გაფართოების მიზნით R_4 წინააღმდეგობა და C_4 ტევადობა მრავალ საფეხურია.

როდესაც R_4 C-ს სისტემის $tg\delta$ უტოლდება, ხოლო R_3 წინააღმდეგობის და C_0 ტევადობის, სიდიდეები გარკვეული კოეფიციენტით უტოლდება C_x -ის ტევადობას, მაშინ ცვლადი ძაბვის

ბოგირი წონასწორობაშია და A და B წერტილებს შორის პოტენციალთა სხვაობა 0-ის ტოლია ე.ი. გალვანომეტრი გვიჩვენებს ნოლს.

გაზომვის სიზუსტის გაზრდის მიზნით გალვანომეტრს გააჩნია მრავალსაფეხურიანი გამაძლიერებელი, რაც საშუალებას გვაძლევს დიდი სიზუსტით გავზომოთ C_x -ის სიდიდე.

იზოლაციის დაზიანების და გადაფარვის შედეგად A და B წერტილები შეიძლება აღმოჩნდეს მაღალი ძაბვის პოტენციალის ქვეშ. ამის გამო A და B წერტილებს მიერთებული აქვთ განმუხტველები და მისი ერთი ბოლო დამიწებულია [8].

გაზომვის ჩატარება ხდება სქემის აკრეფის და მისი სისწორის დარწმუნების შემდეგ. მაღალი ძაბვის წყაროდან გამოსაცდელ ობიექტს მიეწოდება გამოსაცდელი ძაბვა. გაზომვა იწყება ობიექტზე ძაბვის მიწოდებიდან ერთი წუთის შემდეგ როდესაც ყველა პოლარიზაციული პროცესები დამყარებულია. R_4 -ის საშუალებით შეირჩევა გაზომვის შესაბამისი დიაპაზონი გამაძლიერებლის დაბალი მგეძნობიარობიდან.

R_3 -ის საშუალებით ცდილობენ ბოგირის მაქსიმალურ გაწონასწორებას ანუ გალვანომეტრის ისრის მიახლოებას ნულთან და იღებენ ანათვალს. შესაბამისი ფორმულებით იანგარიშება C_x ტევადობის სიდიდე და დანაკარგების $tg\delta$.

ელექტროსაიზოლაციო სისტემის დიელექტრიკული დანაკარგების და წინაღობის გაზომვა მოწყობილობის ქსელიდან გამორთვას და სალტების სრულ მოხსნას მოითხოვს, რაც ხანგრძლივი და შრომატევადი პროცესია.

2.2 ძალოვანი ტრანსფორმატორების უქმი სვლის დენისა და დანაკარგების სიმძლავრის განსაზღვრა

უქმი სვლა ეწოდება ტრანსფორმატორის მუშაობის ისეთ რეჟიმს, რომლის შემთხვევაშიც მეორადი გრაგნილი გახსნილია, ხოლო პირველად გრაგნილს გარკვეული სიდიდის ძაბვა (საქარხნო გამოცდების დროს ნომინალური, პროფილაქტიკური გამოცდების დროს ცვლადი ძაბვა 220ვ ან 380ვ) მიეწოდება. ამ შემთხვევაში პირველად

გრაგნილში ისაზღვრება უქმი სვლის დანაკარგების სიმძლევრე და დენის სიდიდე. რადგანაც სასარგებლო სიმძლავრე ტრანსფორმატორიდან პრაქტიკულად ნულის ტოლია, ამიტომ უქმი სვლისას პირველად გრაგნილზე მიწოდებული სიმძლავრე მთლიანად იხარჯება მაგნიტოგამტარში მაგნიტურ დანაკარგებზე.

მაგნიტური დანაკარგების წყაროს ძირითადად მაგნიტოგამტარის სისტემატური გადამაგნიტება და გრიგალური დენები წარმოადგენს. მაგნიტური დანაკარგების შემცირების მიზნით მაგნიტოგამტარს თხელი, ერთმანეთისგან იზოლირებული ფირფიტებისაგან ამზადებან. იზოლაციის დარღვევის ან მაგნიტოგამტარში დენის შეკრული კონტურის არსებობის შემთხვევაში, მაგნიტური დანაკარგები იზრდება, ეი იზრდება უქმი სვლის დანაკარგებიც. უქმი სვლის დანაკარგები ასევე იზრდება რომელიმე გრაგნილში დენის შეკრული წრედის არსებობისას, ანუ მოკლედშერთული ხვიის არსებობის შემთხვევაში.

უქმი სვლის დანაკარგების გაზრდა ძირითადად გამოწვეულია მაგნიტური დანაკარგების ან გრაგნილში ელექტროგამტარობით გამოწვეული დანაკარგების გაზრდით.

მაგნიტური დანაკარგების გაზრდის მიზეზებია: [10]

1. ელექტროტექნიკური ფოლადის ფირფიტების არასაკმარისი იზოლაცია;
2. მაგნიტოგამტარში ელექტროტექნიკური ფოლადის ფურცლების გადამოკლება;
3. მაგნიტოგამტარში მოსაჭიმი სარჭების, ზესადებების, უდლის კოჭის იზოლაციის დაზიანება და სხვა;
4. მაგნიტოგამტარის დამზადება უფრო სქელი ელექტროტექნიკური ფოლადის ფირფიტებისგან, ვიდრე ანგარიშითაა გათვალისწინებული;
5. მაგნიტოგამტარის არასწორი ჩამიწება (ჩამიწება ორ წერტილში).

გრაგნილებში ელექტროგამტარობით გამოწვეული დანაკარგების გაზრდის მიზეზებია:

6. ხვიათაშორისი მოკლედ შერთვები;
7. პარალელური ხვიების დამოკლება;

8. პარალელურ შტოებში ხვიათა არათანაბარი რაოდენობა.

მოკლედ გავანაალიზოთ ეს მიზეზები:

1. ელექტროტექნიკური ფოლადის ფირფიტებს შორის ცუდმა იზოლაციამ შეიძლება გამოიწვიოს უქმი სვლის დანაკარგების გაზრდა 10-15%-ით. ეს დანაკარგები უმეტესად თანაბრადაა გადანაწილებული მაგნიტოგამტარში.

2. მაგნიტოგამტარში ფოლადის ფირფიტების გადამოკლება წარმოიქმნება ფირფიტებს შორის ცუდი იზოლაციის გადახურებით ან იზოლაციის დაზიანებით გარკვეულ უბნებში, რის გამოც ამ უბნის ტემპერატურა იზრდება და საბოლოოდ ფოლადის ფირფიტები ერთმანეთს შეეცხობა. ეს მოვლენა “ფოლადში ხანძრის” სახელითაა ცნობილი.

3. მაგნიტოგამტარის შემკვერელი და მოსაჭიმი სარჭების იზოლაციის დარღვევას სხვადასხვა მიზეზები იწვევს, რომელთაგან აღსანიშნავია: სარჭების საიზოლაციო მილაკების არ არსებობა ან მოკლე მილაკები, გრაფიტის დაწნევისას სარჭების იზოლაციის მექანიკური დაზიანება და სხვა. ყოველივე ეს მაგნიტოგამტარში დენის შეკრული წრედის არსებობას იწვევს, რის გამოც უქმი სვლის დანაკარგები იზრდება.

4. მაგნიტური დანაკარგების შემცირების მიზნით მაგნიტოგამტარს ელექტროტექნიკური ფოლადის თხელი ფირფიტებისაგან ამზადებენ, ამიტომ ფირფიტის სისქის გაზრდას უქმი სვლის დანაკარგების გაზრდამდე მიყვავართ. ეს დეფექტი ძირითადად საქარხნო გაზომვებისას გამოვლინდება.

5. ტრანსფორმატორის არასწორი ტრანსპორტირების შემთხვევაში ადგილი აქვს აქტიური ნაწილის ბაკის მიმართ დაძვრას, რის გამოც მოსალოდნელია მაგნიტოგამტარის მექანიკური შეხება მიმმართველ სარჭებთან. ამის გამო მაგნიტოგამტარი ორ წერტილში აღმოჩნდება ავზთან ელექტრულად დაკავშირებული, რის შედეგადაც იარსებებს დენის შეკრული კონტური. ეს კი უქმი სვლის დანაკარგების გაზრდას იწვევს.

6. გრაგნილებში მოკლედ შერთვის შემთხვევაში ანუ ხვიების სრული ელექტრული გადამოკლებისას უქმი სვლის დენის სიდიდე მნიშვნელოვნად იზრდება.

7. ხვიებში არასრული მოკლედ შერთვის შემთხვევაში ან პარალელების გადამოკლებისას უქმი სვლის დენი მნიშვნელოვნად არ იმატებს, ხოლო უქმი სვლის დანაკარგები 7%-მდე იზრდება.

თანახმად სტანდარტისა, უქმი სვლის ცდას ატარებენ ძალოვანი ტრანსფორმატორის (>1000კვა) საქარხნო გამოცდებისას, ექსპლუატაციაში შეყვანის დაწყებამდე, რემონტის დაწყების ან დამთავრების შემდეგ, ასევე გრაგნილის დაწნეხვის ან სერიოზული ავარიის შემდეგ.

უქმი სვლის ცდა ტარდება, როგორც ნომინალურ, ასევე დაბალ ($5-10\%U_6$) ძაბვაზე. ტრადიციულად ძაბვა ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის გრაგნილს მიეწოდება.

ცდის დაწყების წინ ტრანსფორმატორი საიმედოდ უნდა იყოს ჩამიწებული. ამასთანავე მაგნიტოგამტარს არ უნდა გააჩნდეს ნარჩენი მაგნეტიზმი, რომელიც გამოწვეულია ტრანსფორმატორის დატვირთვის ქვეშ მოულოდნელად გამორთვით ან შრობის პროცესში მუდმივი დენით გაცხელებით [9].

ნარჩენი მაგნეტიზმისგან მაგნიტოგამტარის განმაგნიტება შემდეგი თანმიმდევრობით ხდება: ერთ-ერთი გრაგნილის ცალკეულ ფაზაში მუდმივ დენს სხვადასხვა მიმართულებით ატარებენ. შემდეგ ამ დენის სიდიდეს 30-40%-ით ამცირებენ და განმაგნიტებას ისევ იმეორებენ მანამ, სანამ განმაგნიტების მინიმალური დენის სიდიდე არ გახდება დაბალ ძაბვაზე უქმი სვლის დენზე ნაკლები, ხოლო მაქსიმალური დენი, რომლითაც განმაგნიტება იწყება, ტოლი უნდა იყოს ნომინალურ ძაბვაზე უქმი სვლის დენის გაორმაგებული სიდიდისა. მუდმივი დენის წყაროდ შეიძლება გამოყენებული იყოს გადასატანი აკუმულატორი ან დიდი სიმძლავრის გამმართველი მოწყობილობა.

თუ ტრანსფორმატორი მუდმივი დენით არ გაცხელებულა, ან ადგილი არ ჰქონდა გრაგნილების წინააღმდეგობის გაზომვას მუდმივი დენის მიმართ, მაშინ განმაგნიტების პროცესის ჩატარება შედეგს არ

იძლევა, ამიტომ უქმი სვლის ცდა სხვა გამოცდების დაწყების წინ ტარდება.

ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დანაკარგების გაზომვისას მნიშვნელოვანი ყურადღება ექცევა მიწოდებული ძაბვის სიხშირეს, რადგან დანაკარგები მაგნიტოგამტარში მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული სიხშირეზე. ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემა გათვლილია $f = 50$ ჰც სიხშირის მიმართ. ამასთანავე საქარხნო პირობებში გაზომვებიც ამ სიხშირეზეა ჩატარებული. სტანდარტი ითვალისწინებს ამ სიხშირიდან $\pm 1\%$ გადახრას და არ მოითხოვს შესწორების კოეფიციენტის გამოყენებას, მაგრამ სიხშირის გათვალისწინება აუცილებელია, თუ უქმი სვლის დანაკარგების სიდიდეს დაბალ ძაბვაზე ვადარებთ საქარხნო გაზომვის შედეგს ($f = 50$ ჰც) ან ცალფაზა ტრანსფორმატორებისათვის.

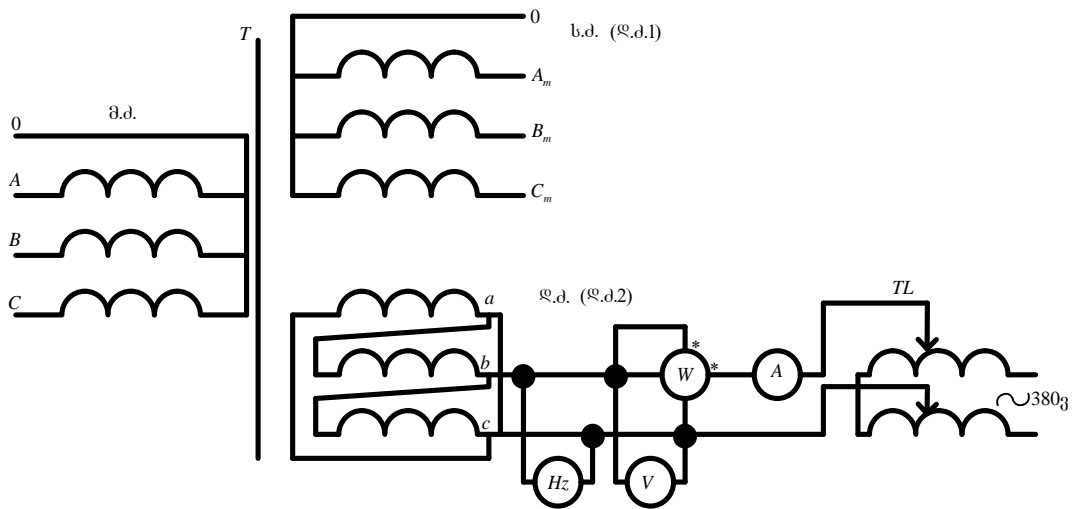
თუ $f \neq 50$ ჰც, მაშინ მიწოდებული ძაბვის U_f სიდიდე f სიხშირეზე შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$U_f = U_{50} \frac{f}{50} \quad (3)$$

სადაც, U_{50} – საქარხნო გაზომვებისას $f = 50$ ჰც-ისას მიწოდებული ძაბვაა; U_f ძაბვაზე ისაზღვრება სიმძლავრის P_f^1 და დენის სიდიდეები. U_f ძაბვაზე მიღებული დენის სიდიდე შეესაბამება ნომინალურ სიხშირეზე დენის სიდიდეს.

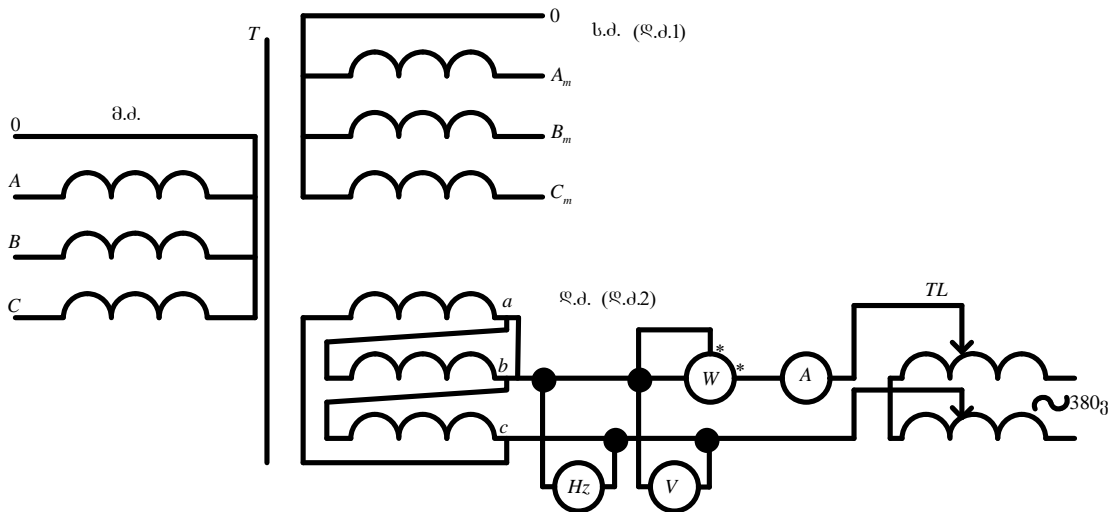
სამფაზა სამგრაგნილა ტრანსფორმატორისათვის უქმი სვლის დანაკარგების გაზომვა დაბალი ძაბვის გრაგნილის ფაზების წყვილ-წყვილად აგზნებით ხდება. ამ შემთხვევაში მიღებული შედეგები არა მარტო საქარხნოს, არამედ ცალკეული ფაზების უქმი სვლის დანაკარგებსაც დარდება, რაც დეფექტის გამოვლენის ერთ-ერთი საშუალებაა. მესამე ფაზის ნაწილობრივი აგზნების გამოსარიცხად, აუგზნებელი ფაზის თავსა და ბოლოს გადაამოკლებენ (ელექტრულად დააკავშირებენ).

პირველ ცდაში α ფაზის თავი და ბოლო გადაამოკლებულია, აგზნება მიეწოდება b და c ფაზებს, იზომება უქმი სვლის დანაკარგები $P_{f(bc)}^1$ და $I_{f(bc)}^1$ (ნახ. №12)



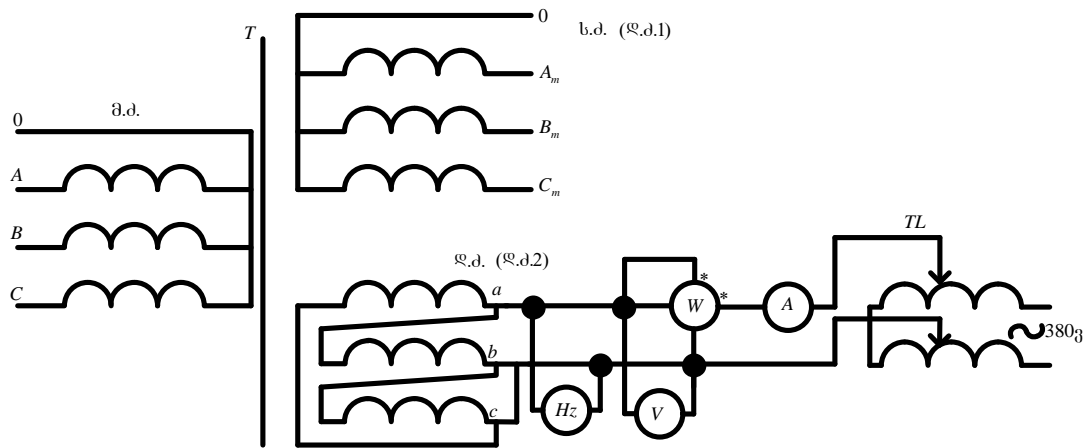
ნახ. №12 სამგრაგნილა ტრანსფორმატორის b და c ფაზებს შორის უქმი სვლის სიმძლავრის და დენის გაზომვის სქემა.

მეორე ცდაში b ფაზის თავი და ბოლო გადამოკლდება, აგზნება მიეწოდება a და c ფაზებს, იზომება უქმი სვლის დანაკარგები $P_{f(ac)}^1$ და $I_{f(ac)}^1$. (ნახ. №13)



ნახ. №13 სამგრაგნილა ტრანსფორმატორის a და c ფაზებს შორის უქმი სვლის სიმძლავრის და დენის გაზომვის სქემა.

მესამე ცდაში c ფაზის თავი და ბოლო გადამოკლებულია, აგზნება მიეწოდება a და b ფაზებს, იზომება $P_{f(ab)}^1$ და $I_{f(ab)}^1$. (ნახ. №14)



ნახ. №14 სამგრაგნილა ტრანსფორმატორის *a* და *b* ფაზებს შორის უქმი სვლის სიმძლავრის და დენის გაზომვის სქემა.

შემდეგ ისაზღვრება $P_{\text{სძ}}$ და ფორმულა (4)-ის საშუალებით იანგარიშება $P_{f(bc)}$, $P_{f(ac)}$ და $P_{f(ab)}$.

$$P_{f(bc)} = P_{f(bc)}^1 - P_{\text{სძ}}; \quad P_{f(ac)} = P_{f(ac)}^1 - P_{\text{სძ}} \quad \text{და} \quad P_{f(ab)} = P_{f(ab)}^1 - P_{\text{სძ}} \quad (4)$$

დეფექტის არ არსებობის შემთხვევაში ტრანსფორმატორისათვის დანაკარგების P_{bc} და P_{ab} სიდიდეები $\pm 5\%$ -ის სიზუსტით ერთმანეთის ტოლია, ხოლო P_{ac} კი დანარჩენებზე $25 \div 50\%$ -ით მეტი შეიძლება იყოს. ამ სხვაობის დიდ დიაპაზონში ცვლილება ტრანსფორმატორების მაგნიტოგამტარის კონსტრუქციული თავისებურებითაა გამოწვეული.

ზოგადად, $\frac{P_{ac}}{P_{ab}}$ და $\frac{P_{ac}}{P_{bc}}$ მიახლოებით ერთმანეთის ტოლია და მათ

შორის სხვაობა $\pm 5\%$ არ აღემატება.

თუ საქარხნო მონაცემები ან ექსპლუატაციაში შეყვანის წინ გაზომვის შედეგები არ არსებობს, მაშინ დეფექტურ ტრ-ში შესაძლებელია ადგილი ჰქონდეს შემდეგ შემთხვევებს:

1. დეფექტურია *a* და *c* ფაზა, ხოლო *b* კარგია. ამ შემთხვევაში დეფექტურია ის ფაზა, რომლის გადამოკლებისას დანაკარგები მინიმალურია;

2. დეფექტი არსებობს ერთდროულად a და c ფაზაში, ხოლო b ფაზა კი დაუზიანებელია. ამ შემთხვევაში P_{ac} -ს და P_{ab} ან P_{bc} -ს შორის სხვაობა 25%-ზე ნაკლებია ან P_{ab} ან P_{bc} მეტია P_{ac} -ზე.

3. დეფექტი არსებობს b ფაზაში, ხოლო a და c ფაზები კი დაუზიანებელია, მაშინ P_{ab} და P_{bc} ერთმანეთისგან $\pm 5\%$ -ით განსხვავდებიან, ხოლო P_{ac} კი მათთან შედარებით 50%-ზე მეტია გაზრდილი.

4. დეფექტურია a და b , ხოლო c დაუზიანებელია, მაშინ P_{ac} და P_{bc} ნაკლებია ვიდრე P_{ab} .

5. დეფექტურია b და c ფაზა, ხოლო a დაუზიანებელია. მაშინ P_{ab} და P_{ac} უფრო ნაკლებია ვიდრე P_{bc} .

6. დეფექტურია სამივე a, b და c ფაზები, მაშინ დანაკარგები P_{ab} , P_{ac} და P_{bc} თითქმის თანაბარია და ძალიან გაზრდილია.

როდესაც წარმოიქმნება აუცილებლობა დაბალ ძაბვაზე უ.ს. დანაკარგების შედარებისა ნომ. ძაბვაზე მიღებულ შედეგთან, მაშინ ჯერ ისაზღვრება ჯამური დანაკარგები (P_0) დაბალ ძაბვაზე

$$P_0 = \frac{P_{bc} + P_{ab} + P_{ac}}{2} \quad (5)$$

ხოლო შემდეგ დანაკარგები მიჰყავთ ნომინალურ ძაბვაზე

$$P_{0\text{ნომ}} = P_0 \left(\frac{U_6}{U'} \right)^n \quad (6)$$

სადაც U_6 დაბალი ძაბვის გრადიენტის ნომ. ძაბვაა $f = 50$ ჰც, U' კი დაბალ ძაბვაზე ($f = 50$ ჰც) გაზომვის ძაბვა.

უმეტეს შემთხვევაში n -ს მიახლოებითი მნიშვნელობა გააჩნია და თუ ტრ-ი აგზნებულია ნომ. ძაბვის 5-10% სიდიდით, მაშინ ცხლად ნაგლინი ელ-ტექნიკური ფოლადისთვის $n \approx 1.8$, ხოლო ცივად ნაგლინი ტექსტურირებული ელ-ტექნიკური ფოლადისთვის კი $n \approx 1.9$.

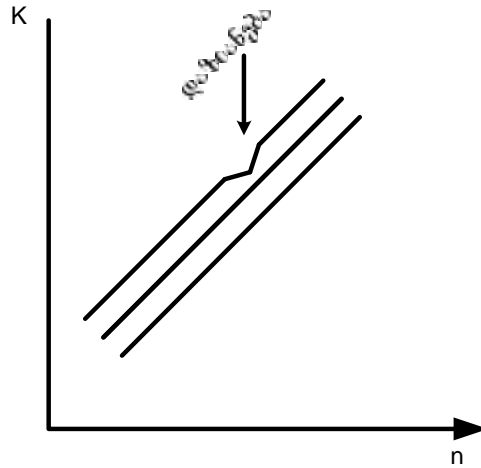
2.3 ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის განსაზღვრა

ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი წარმოადგენს ტრანსფორმატორის დაბალი და მაღალი ძაბვის გრაგნილებზე ძაბვების შეფარდებას, კერძოდ

$$K = \frac{N_{\text{მბ}}}{N_{\text{დბ}}} = \frac{U_{\text{მბ}}}{U_{\text{დბ}}} \quad (7)$$

ის ტრ-ის ერთ-ერთი მახასიათებელი პარამეტრია და მისი შემოწმება აუცილებელია ექსპლოატაციაში შეყვანის წინ, რემონტის შემდეგ ან ავარიის შემთხვევაში. ამ უკანასკნელ შემთხვევებში მისი საშუალებით გამოვლინდება ტრანსფორმატორში დაზიანებული ხვიების არსებობა ან დეფექტები. თუ ტრანსფორმატორს გააჩნია ძაბვის რეგულირების გადამრთველი, მაშინ აუცილებელია შემოწმდეს ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი გადამრთველის ყველა მდგომარეობისათვის. დეფექტების გამოვლენის მიზნით მიღებულ შედეგს ადარებენ საქარხნოს.

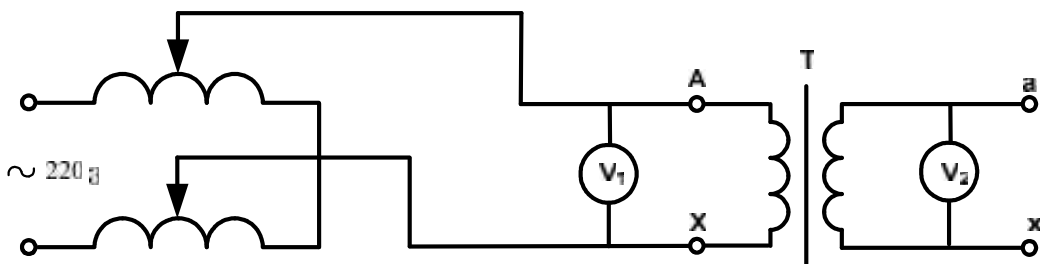
სამუაზა ტრანსფორმატორის შემთხვევაში ფაზებს შორის განსხვავება არ უნდა აღემატებოდეს $\pm 1\%$ -ს და თუ ეს პირობა არ კმაყოფილდება ეს დეფექტის არსებობაზე მიუთითებს. დეფექტი შეიძლება იყოს როგორც დაბალი ძაბვის ასევე მაღალი ძაბვის გრაგნილში. ხშირია შემთხვევა, როცა გადამრთველის რომელიმე კონტაქტი არასწორადაა შეერთებული ან დაზიანებულია. ამ შემთხვევაშიც დეფექტი გამოვლინდება, კერძოდ თუ ავაგებთ K -ს დამოკიდებულების გრაფიკს გადამრთველის n მდგომარეობაზე ის სწორხაზოვნად უნდა იცვლებოდეს სამივე ფაზისათვის. (ნახ. №15)



ნახ. №15 ტრანსფორმატორის K -ს დამოკიდებულება დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირებადი გადამრთველის მდგომარეობაზე (n)

K ისაზღვრება ქსელიდან გამორთული დაუტვირთავ ტრანსფორმატორზე, რადგან, ტრ-ციის კოეფიციენტი, ანუ ტრ-ის ხეიბის რაოდენობის შეფარდება მიწოდებული ძაბვის სიდიდეზე დამოკიდებული არ არის, ამიტომ სავალდებულო არაა ტრ-ს მივაწოდოთ მაღალი ან ნომინალური ძაბვა. ის შეიძლება განისაზღვროს დაბალი ძაბვის საშუალებითაც (220ვ, 380ვ), მაგრამ უნდა შევინარჩუნოთ ტრ-ის ნომინალური სიხშირე.

ცდისას ძაბვა ეწოდება მ.ძ. გრაგნილს და ვოლტმეტრის საშუალებით იზომება ძაბვა მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილებზე. გამოყენებულ ვოლტმეტრებს არ უნდა გააჩნდეს ცდომილება, ხოლო ანათვალი უნდა ავიღოთ ისრის დაწყნარების შემდეგ. ვოლტმეტრის გაზომვის დიაპაზონი იმგვარად უნდა შევირჩიოთ რომ ანთვლები ავიღოთ შკალის მეორე ნახევარზე, რაც გაზომვის ფარდობით ცდომილებას ამცირებს. ზოგადად ასეთ სქემას შემდეგი სახე აქვს: (ნახ. №16)



ნახ. №16. ტრ-რის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის განსაზღვრის სქემა

სადაც T ძაბვის წყაროა რომლის საშუალებითაც ძაბვა ეწოდება AX გრაგნილს, ხოლო ax გრაგნილზე U_2 ვოლტმეტრის საშუალებით ვსაზღვრავთ ტრანსფორმირებული ძაბვის სიდიდეს და ამ ორი ძაბვის შეფარდებით ვსაზღვრავთ K -ს.

გაზომვის სიზუსტის გაზრდის მიზნით უნდა გამოვიყენოთ 0.2 კლასის ხელსაწყოები და ანათვლები ერთდროულად ავიღოთ ორივე ვოლტმეტრზე, თუ მიღებული შედეგი საპასპორტო მონაცემიდან $\pm 2\%$ -ზე ნაკლებად განსხვავდება მაშინ შედეგი დამაკმაყოფილებელია, თუ განსხვავება $\pm 2\%$ -ს აღემატება, მაშინ გადაამოწმებენ ფაზებს შორის განსხვავებას, კერძოდ მაქსიმუმს გამოაკლებენ მინიმუმს, გაყოფენ საშუალოზე და გაამრავლებენ 100-ზე, თუ ამ შემთხვევაშიც განსხვავება $\pm 2\%$ -ს აღემატება, მაშინ ან რომელიმე ფაზის გრაგნილია დაზიანებული, ან დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირების კონტაქტებია არეული. ეს ორივე შემთხვევა დამატებით ცდაში – „გრაგნილის წინააღმდეგობის გაზომვა მუდმივი დენის მიმართ“ გამოვლინდება, ამასთანავე უნდა ავაგოთ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის დამოკიდებულების მრუდი ყველა ფაზისათვის და ყველა შემთხვევისათვის დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირების მდგომარეობის მიხედვით. მრუდი სწორხაზოვანი იქნება, მაგრამ რევერსის მდგომარეობაში ტრ-ციის კოეფიციენტები ერთმანეთს დაემთხვევა. თუ სწორხაზოვნება დაირღვა (ანუ წერტილი ამოვარდა), მაშინ გაზომვებს ვატარებთ თავიდან ამ მდგომარეობისათვის.

2.4 გრაგნილის ომიური წინააღმდეგობის გაზომვა მუდმივი დენის მიმართ

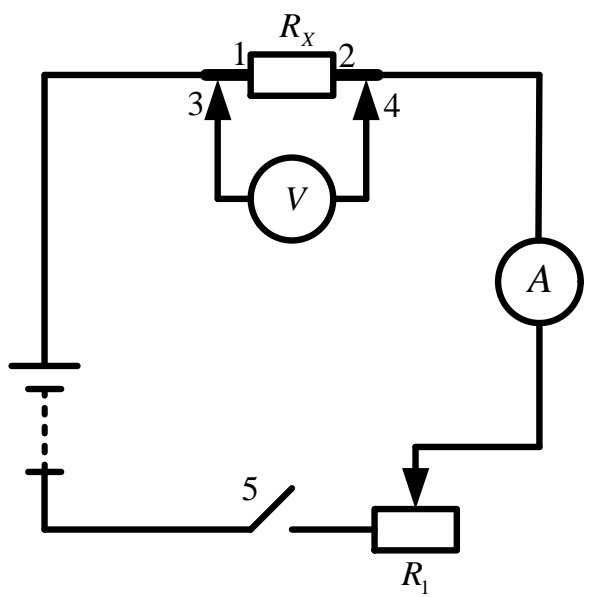
ნებისმიერი ელ-ტექნიკური მოწყობილობა გარკვეული სახის გრაგნილებს შეიცავს, რომლებიც ფუნქციონალური დანიშნულების მიხედვით შეიძლება იყვნენ მაღალი ძაბვის, საშუალო ძაბვის და დაბალი ძაბვის. გრაგნილების ხვიებს შორის გარკვეული სახის შეერთებები არსებობს. ექსპლუატაციის განმავლობაში შესაძლებელია

დაირღვეს შეერთების მთლიანობა და გაიზარდოს გარდამავალი წინაღობა, ან გრაგნილში მოკლედ შერთვა მოხდეს, მაშინ გრაგნილის წინააღმდეგობა შემცირდება.

როდესაც ქარხანაში დამზადდება ელ-ტექნიკური მოწყობილობა საქარხნო პირობებში გარკვეულ ტემპერატურაზე იზომება გრაგნილის წინააღმდეგობა მუდმივი დენის მიმართ და მისი სიდიდე ომებში შეტანილია მოწყობილობის პასპორტში. რადგან ნებისმიერი გამტარი მასალის კუთრი წინააღმდეგობა და შესაბამისად მისგან დამზადებული გრაგნილის წინააღმდეგობის სიდიდე ტემპერატურაზეა დამოკიდებული, ამის გამო აქვე უნდა იყოს მითითებული გაზომვის ტემპერატურის მნიშვნელობაც.

საერთოდ წინააღმდეგობის გაზომვის უმარტივესი მეთოდი ოთხზონდიანი მეთოდია, რომელიც გულისხმობს, რომ გასაზომ R_x წინააღმდეგობაში დენის წყაროდან 1 და 2 დენური კონტაქტების საშუალებით გავატარებთ მუდმივი სიდიდის დენს, ხოლო მესამე და მეოთხე პოტენციალური კონტაქტების საშუალებით ვოლტმეტრის გამოყენებით გავზომავთ ძაბვის სიდიდეს (ნახ. №17), მაშინ წინააღმდეგობა ომებში ტოლი იქნება:

$$R(\text{ომ}) = \frac{U(\text{ვოლტი})}{I(\text{ამპერი})} \quad (8)$$

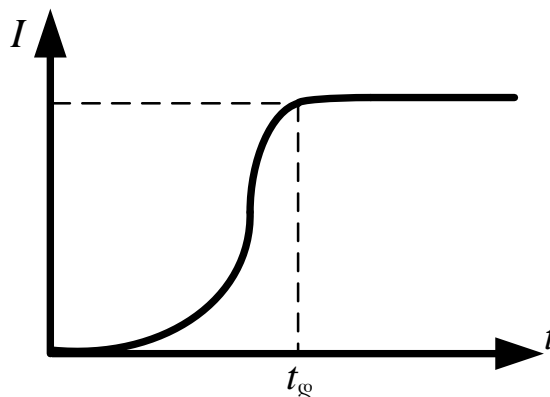


ნახ. №17 წინააღმდეგობის გაზომვის ოთხზონდიანი მეთოდი

R_1 -ის საშუალებით კი წინააღმდეგობაში გამავალი დენის სიდიდის რეგულირება ხდება.

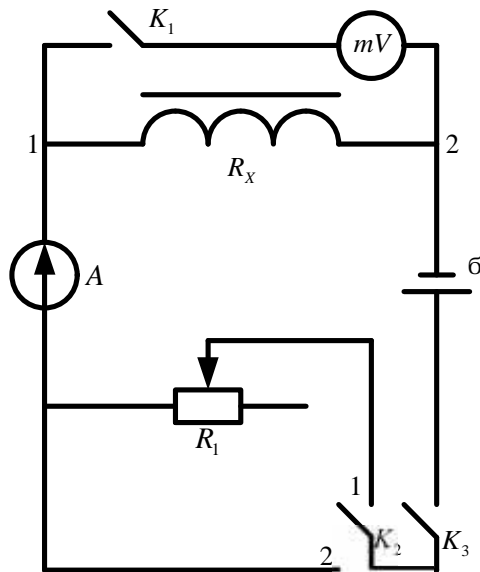
გაზომვების დროს ხელსაწყოს დიაპაზონი ისე უნდა შეირჩეს, რომ ანათვლები ავიდნენ ხელსაწყოს შკალის მეორე ნახევარში. ხოლო ხელსაწყოს სიზუსტე, რაც შეიძლება მაღალი უნდა იყოს, კერძოდ მიღებულია 0.1 და 0.2 კლასის გამოყენება. საერთოდ გაზომვების დროს ყოველთვის გამოყენებული უნდა იყოს ერთი და იგივე ტიპის და კლასის ხელსაწყოები, რათა ადვილი იყოს შედარება.

ძალიან ელ-ტექნიკური მოწყობილობების გრაგნილი უმეტესად მაგნიტურ გულარაზეა ჩამოცმული და თუ აღნიშნული სქემით 5 ჩამრთველს ჩავრთავთ, ამპერმეტრის ჩვენება გარკვეული დროის შემდეგ მიაღწევს დამყარებულ მნიშვნელობას (ნახ. №18),



ნახ. №18 დენის სიდიდის ცვლილება გრაგნილში

რადგანაც მაგნიტური გულარის მქონე გრაგნილში მუდმივი დენის გაგლის დროს გარკვეული სახის გარდამავალი პროცესი მიმდინარეობს. ამის გამო გაზომვის უფრო რთულ სქემას იყენებენ (ნახ. №19).



ნახ. №19 ტრანსფორმატორის გრაგნილის (R_x) წინააღმდეგობის გაზომვის სქემა მუდმივი დენის მიმართ

გასაზომი R_x წინააღმდეგობა, როგორც ავლნიშნეთ მაგნიტურ გულარაზე ჩამოცმულ სპილენძის ან იშვიათად ალუმინის გრაგნილს წარმოადგენს, რომელსაც სპეციალური 1, 2 მომჭერებით მუდმივი დენის წყაროდან K_3 ჩამრთველის და K_2 გადამრთველის საშუალებით მივაწოდებთ დენს, რომლის სიდიდის რეგულირება R_1 წინააღმდეგობის საშუალებით ხდება, მაგრამ დიდი ინდუქტივობის მქონე გრაგნილის წინააღმდეგობის გაზომვის შემთხვევაში დამყარების დროის შემცირების მიზნით, მცირე ხნით R_1 წინააღმდეგობას გაზომვის სქემიდან გამორთავენ და დენს პირდაპირ გაატარებენ K_2 -ის საშუალებით. როდესაც ამპერმეტრის ჩვენება დამყარდება, K_2 -ს დააბრუნებენ პირველ მდგომარეობაში და ამით გარკვეულწილად შეზღუდავენ დენის სიდიდეს. ამ შემთხვევაშიც ამპერმეტრის ჩვენების დამყარებული მდგომარეობის მიღწევისას K_1 ჩამრთველის საშუალებით ჩართავენ მუდმივი დენის ვოლტმეტრს (მ.ვ.) და 1 წუთის შემდეგ აიღებენ ანათვლებს. შესაბამისი მაშტაბისა და გადაანგარიშების შემდეგ განგსაზღვრავთ დენისა და ძაბვის სიდიდეს და ვიანგარიშებთ გრაგნილის წინააღმდეგობას ომებში. უნდა გავითვალისწინოთ ისიც, რომ ტემპერატურის მიხედვით წინააღმდეგობა იცვლება. ამისათვის

არსებობს წინააღმდეგობის ტემპერატურული კოეფიციენტი, რომელიც გვიჩვენებს თუ როგორ იცვლება 1 ომიანი ნიმუშის წინააღმდეგობა ტემპერატურის $1^{\circ}C$ შეცვლისას. ტემპერატურის დადგენა ხდება შემდეგნაირად: A, B, C ფაზების R_A, R_B, R_C ერთმანეთს დარდება და თუ მათ შორის განსხვავება $\pm 2\%$ -ს არ აღემატება თვლიან, რომ არცერთი ფაზა დაზიანებული არ არის და საყრდენად იღებენ B ფაზის წინააღმდეგობას. ამ შემთხვევაში ტემპერატურა შემდეგი ფორმულით იანგარიშება:

$$t = \frac{R}{R_0}(t_0 + T) - T \quad (9)$$

სადაც t მოცემული გაზომვის ტემპერატურაა, რომლის შესაბამისია R , ხოლო R_0 და t_0 საქარხნო გაზომვის მონაცემებია, სადაც T სპილენძის კუთრი წინააღმდეგობის ტემპერატურული კოეფიციენტის შებრუნებული სიდიდეა.

$$T = \frac{1}{r} = \frac{1}{0.0043} = 235 \quad (10)$$

ამის შემდეგ გრაგნილის წინააღმდეგობა შედარების მიზნით უნდა მივიყვანოთ საქარხნო გაზომვის ტემპერატურაზე. ამისათვის ვიყენებთ ფორმულას:

$$R' = R_0 \frac{t + 235}{t_0 + 235} \quad (11)$$

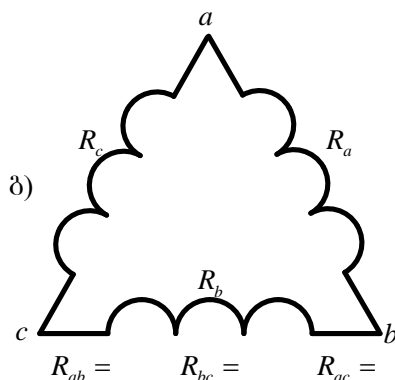
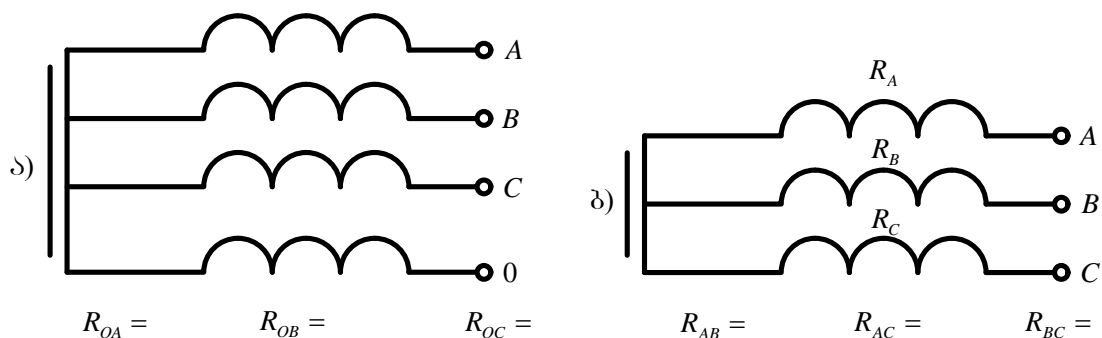
როდესაც საქარხნო და ჩვენს მიერ ჩატარებული გაზომვის მონაცემები ერთ ტემპერატურაზე გვაქვს მიყვანილი, ვახდენთ უკვე მათ ურთიერთ შედარებას, კერძოდ:

$$\frac{R_{\text{საქ}} - R'}{R'} 100\% \leq \pm 2\% \quad (12)$$

ამ შემთხვევაში ჩვენ ვაღვანთ, რომ საქარხნო გაზომვასთან შედარებით მნიშვნელოვანი ცვლილება არ მომხდარა, თუ რომელიმე აღნიშნული პირობა არ სრულდება, ეს იმას ნიშნავს, რომ გრაგნილში აღვილი აქვს დაზიანებას. კერძოდ, თუ ეს სხვაობა დადებითია, ანუ $R_{\text{საქ}} > R'$ ე.ი. ექსპლუატაციის განმავლობაში გრაგნილში მოხდა მოკლედ შერთვა, ხოლო თუ $R_{\text{საქ}} < R'$, მაშინ იგულისხმება, რომ

გრაფილში შეერთების ადგილების გარდამავალი წინააღმდეგობა გაიზარდა.

რადგან სხვადასხვა სახის ძალოვანი დანადგარების გრაფილები სხვადასხვა სახის შესრულებისაა, ამიტომ გაზომვის სქემებიც სხვადასხვა სახის არსებობს. (ნახ. №20)



ნახ. №20 ძალოვან ტრანსფორმატორებში გრაფილების შეერთების სქემები

როდესაც გრაფილები ვარსკვლავადაა შეერთებული და 0-იც გამოყვანილია, ამ შემთხვევაში იზომება ცალკეული ფაზის წინააღმდეგობა 0-ის მიმართ: R_{0A}, R_{0B}, R_{0C} . თუ გრაფილები შეერთებულია ვარსკვლავად და 0 არ არის გამოყვანილი მაშინ იზომება წინააღმდეგობა ორ ფაზას შორის: R_{AB}, R_{BC}, R_{AC} . სამკუთხა შეერთებისას, რომელიც ძირითადად გვხვდება დაბალი ძაბვის გრაფილში, იზომება ცალკეულ ფაზებს შორის წინააღმდეგობები: R_{ab}, R_{bc}, R_{ac} .

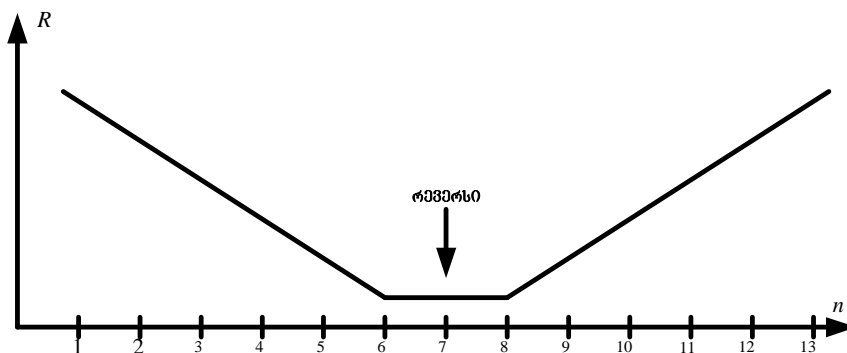
დაზიანებული გრაგნილის გამოვლენა ა) სქემის შემთხვევაში ადვილია ის პირდაპირ ჩანს, ხოლო ბ) და გ) სქემების შემთხვევაში შემდეგი ფორმულების საშუალებით იანგარიშება:

$$\begin{aligned} \text{ბ) } R_{AB} &= R_A + R_B & R_{AC} &= R_A + R_C & R_{BC} &= R_B + R_C \\ \text{გ) } R_{ab} &= \frac{R_a(R_b + R_c)}{R_a + R_b + R_c} & R_{ac} &= \frac{R_c(R_b + R_a)}{R_a + R_b + R_c} & R_{bc} &= \frac{R_b(R_a + R_c)}{R_a + R_b + R_c} \end{aligned} \quad (13)$$

როდესაც სამფაზაა სისტემა, მაშინ შედარებისათვის ხშირად იყენებენ შემდეგ ფორმულას: რადგან იზომება წინააღმდეგობის სამი სიდიდე ამ სამიდან უდიდესს $R_{\text{უდიდესი}}$ აკლდება უმცირესი $R_{\text{უმცირესი}}$, იყოფა მათ საშუალოზე, მრავლდება 100%-ზე და ეს სიდიდე ნაკლები ან ტოლი უნდა იყოს 2%-ზე:

$$\frac{R_{\text{უდიდესი}} - R_{\text{უმცირესი}}}{R_{\text{საშუალო}}} 100\% \leq 2\% \quad (14)$$

მაღალი ძაბვის უმეტეს ძალოვან ტრანსფორმატორებს მაღალი ძაბვის გრაგნილში დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირების გადამრთველი აქვთ, რომლის მდგომარეობის მიხედვითაც იცვლება გრაგნილის წინააღმდეგობის სიდიდე. ამის გამო უნდა გაიზომოს გრაგნილის წინააღმდეგობა გადამრთველის ყველა მდგომარეობის მიხედვით რევერსის მდგომარეობას +1 და აიგოს წინააღმდეგობის განაწილების გრაფიკი გადამრთველის მდგომარეობის მიხედვით. (ნახ. №21)



ნახ. №21 ტრანსფორმატორის დატვირთვის ქვეშ ძაბვის მარეგულირებელი მოწყობილობის წინააღმდეგობის დამოკიდებულება გადამრთველის მდგომარეობაზე

რევერსის შემდეგ, თუ ერთ-ერთი მდგომარეობა რევერსის დაწყების წინა მდგომარეობას ემთხვევა, ეს იმას ნიშნავს, რომ გადამრთველში რევერსის კონტაქტის გარდამავალი წინააღმდეგობა ნორმალურ ფარგლებშია, ხოლო თუ ამ დამოკიდებულებაზე საფეხური გაჩნდა, ეს ნიშნავს რომ კონტაქტია გაჭედილი და თუ წინააღმდეგობის სიდიდე შემცირების მაგივრად მომდევნო საფეხურზე გაიზარდა, ეს ნიშნავს, რომ კონტაქტის გარდამავალი წინააღმდეგობაა გაზრდილი. აღნიშნულ შეფასებას და დამოკიდებულების გრაფიკს ვაკეთებთ და ვაგებთ სამივე ფაზისათვის, როგორც დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირების გადამრთველისათვის, ისე აგზნების გარეშე ძაბვის რეგულირების გადამრთველისათვის.

გაზომვებისას გამოყენებული მუდმივი დენის კვების წყარო უნდა გვაძლევდეს საშუალებას 20-30ა დენი გავატაროთ გრაგნილში. ამისათვის იყენებენ ჩვეულებრივ აკუმულატორს (რომლის ტევადობა 130ასთ-ს აღემატება) და დენის სარეგულირებლად ჩართულ R_1 წინააღმდეგობას გათვლიან დიდ სიმძლავრეზე (3-5კვტ).

ძაბვისა და დენის მნიშვნელობას ვოლტმეტრითა და ამპერმეტრით ავითვლით მაშინ, როდესაც მათი სიდიდეები დამყარდება და დროის მიხედვით არ შეიცვლება, ან ცვლილება უმნიშვნელო სიდიდის იქნება, რა თქმა უნდა შკალის მეორე ნახევარზე.

2.5 დეფექტები ძალოვან ტრანსფორმატორებში

ძალოვან ტრანსფორმატორებში დეფექტი შეიძლება წარმოიქმნას ექსპლუატაციის განმავლობაში, ან თავიდანვე არსებობს ტრანსფორმატორში.

რადგან ტრანსფორმატორი დამზადებისთანავე ყოველმხრივ შემოწმებას გადის, ამიტომ უხეში ან ისეთი დეფექტის არსებობა ტრანსფორმატორში, რომელიც საგრძნობ გავლენას მოახდენს მის საექსპლუატაციო მახასიათებლებზე გამორიცხულია.

ექსპლუატაციის განმავლობაში შეიძლება სხვადასხვა სახის დეფექტები წარმოიქმნას. მათი კლასიფიკაცია განლაგების ან წარმოქმნის მიხედვით ხდება. ამ დეფექტებიდან აღსანიშნავია:

1. დეფექტი გრაგნილში – ამ სახის დეფექტს უმეტესად გრაგნილის ხვიებს შორის მოკლედშერთვა წარმოადგენს. ამის მიზეზი შეიძლება იყოს ხვიათა შორის იზოლაციის დარღვევა ან დაბალი ძაბვის გრაგნილზე ხანგრძლივ მოქმედი მოკლედშერთვის არსებობა, რაც ასევე იზოლაციის დარღვევას იწვევს.

ასევე იზოლაციის დაზიანება შეიძლება გამოიწვიოს დაბალი ძაბვის გრაგნილზე მდგრადი მოკლედ შერთვის არსებობამ რის შედეგადაც ასევე ირღვევა ხვიათშორისი იზოლაცია. თუ გრაგნილის იზოლაციაზე დიდი რაოდენობის ჭუჭყი დაგროვდა ან იზოლაცია მაღალი ტენშემცველობის არის, მაშინ მოსალოდნელია ხვიათშორის იზოლაციის გარღვევა, რის გამოც მოკლედშერთვა წარმოიქმნება.

ზოგიერთ შემთხვევაში როდესაც ხვიათშორის იზოლაცია მექანიკურად დაზიანებულია ან გაცვეთილია, ის ინარჩუნებს გარეგან სახეს და შინაგან ფორმას, მაგრამ მისი საიზოლაციო მახასიათებლები იმდენად გაუარესებულია, რომ მუშა ძაბვაზე შესაძლებელია ელექტრული გარღვევა.

2. მაგნიტოგამტარის დეფექტი – წარმოიქმნება მაგნიტოგამტარის ცალკეული ფურცლების იზოლაციის დარღვევის შედეგად, რაც მაგნიტოგამტარის გადახურებას გამოიწვევს და ეგრედწოდებულ „ხანძარი გულარაში“ სახელითაა ცნობილი.

მაგნიტოგამტარში აგრეთვე დეფექტი შეიძლება წარმოიქმნას ჩამიწების კონტურის მთლიანობის დარღვევით, რის შედეგადაც წარმოიქმნება მყარი იზოლაციის გარღვევა.

ტრანსფორმატორი რომელიც ხანგრძლივი დროის განმავლობაში იმყოფებოდა ექსპლუატაციაში ხასიათდება მომჭიმავი საღტეების და ბანდაუების იზოლაციის დაზიანებით, რის შედეგადაც ტრანსფორმატორში წარმოიქმნება დენის ჩაკეტილი კონტური.

3. რეგულირებადი გადამრთველის დაზიანების შემთხვევაში ადგილი აქვს ამ მოწყობილობის კონტაქტებზე ნაკერწკლის

წარმოქმნას, რომელიც ზეთის დაშლას, კონტაქტის ამოწვას იწვევს და საბოლოოდ დატვირთვის ქვეშ რეგულირებად გადამრთველს აზიანებს.

სხვადასხვა შემთხვევებში ძალოვან ტრანსფორმატორებში შეიძლება ადგილი ქონდეს შემდეგი სახის დეფექტებს:

- კონტაქტური შეერთების ადგილის გადახურება, რომელიც გამოწვეულია მონტაჟის დროს დაშვებული შეცდომებით.

- ტრანსფორმატორის ავზის ჰერმეტიზაციის დარღვევა გამოწვეულია შეერთების ადგილების დაზიანების გამო.

- ზეთის გაჟონვა - შეერთების ადგილზე შუასადების დაზიანების გამო.

არაკერძოებულ შემყვანების დატენიანება ან გაჭუჭყიანება იზოლაციის გარღვევას იწვევს.

რადგანაც ყველა დეფექტის, როგორც ჩამოთვლა, ასევე გამოვლენა ტექნიკურად შეუძლებელია, ამიტომ ძირითადად ყურადღება იმ დეფექტების გამოვლენას ექცევა, რომლებიც უფრო ხშირად წარმოიქმნიებიან და უფრო მეტად საშიში არიან ტრანსფორმატორების მუშაობისთვის.

ექსპლუატაციის განმავლობაში ყველა საიზოლაციო სისტემაში მეტნაკლებად უარესდება ელექტროსაიზოლაციო თვისებები. ეს მოვლენა ელექტროსაიზოლაციო მასალის მახასიათებელი თვისებებია და მას ბუნებრივ დაძველებას უწოდებენ. ასევე დაძველებას განიცდის: მაგნიტოგამტარები და ელექტროგამტარი მასალები. აღნიშნული პროცესები ძლიერდებიან ტემპერატურის და სხვა გარეშე ფაქტორების ზემოქმედებით.

ტემპერატურის ზემოქმედება გარკვეული ზღვრის შემდეგ მნიშვნელოვან ცვლილებას იწვევს ელექტროსაიზოლაციო მასალებში. კერძოდ თუ ტემპერატურა 110 °C აღემატება მაშინ მყარი იზოლაციის, კერძოდ ქაღალდის დაძველების პროცესი 8 °C-ით ტემპერატურის გაზრდისას თითქმის 2-ჯერ მეტად ინტენსიურად მიმდინარეობს. ანალოგიურ მოვლენას აქვს ადგილი ტრანსფორმატორის ზეთშიც, მაგრამ ტემპერატურის გაზრდა უფრო მნიშვნელოვან ცვლილებას იწვევს იმ ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში, რომლებიც ხანგრძლივად იმყოფებიან ექსპლუატაციაში. აქედან გამომდინარე

ექსპლუატაციის განმავლობაში ტემპერატურის ზემოქმედებით წარმოქმნილი დეფექტები უფრო მეტ გავლენას ახდენენ მოძველებული ელექტროტექნიკური მოწყობილობების საექსპლუატაციო მახასიათებლებზე ვიდრე ახალის.

ხშირად ძალოვან ტრანსფორმატორებს მუშაობა უწყვეტ მოკლედშერთვის ავარიულ რეჟიმში, ამ დროს მეკლედშერთვის დენები იწვევენ არამარტო დინამიურ ზემოქმედებას ტრანსფორმატორის გრაგნილზე, არამედ თბურ ზემოქმედებასაც. რის შედეგადაც ადგილი აქვს გრაგნილის გარკვეული ნაწილის დეფორმაციას. ამ დროს შესაძლებელია იზოლაციის დაზიანებაც.

გადამეტაბვის იმპულსების მოქმედება ძირითადად აზიანებს ტრანსფორმატორის ზეთბარიერულ და ზეთქაღალდიან იზოლაციას. ზოგჯერ გადამეტაბვის იმპულსმა შეიძლება ზემოქმედების თანავე არ გამოიწვიოს ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის დაზიანება, მაგრამ დასაწყისი მისცეს ისეთ თანდათანობით განვითარებად დეფექტებს, რომლებიც ექსპლუატაციის ხანგრძლივ პერიოდში ავარიის გამომწვევი მიზეზები გახდებიან.

ელექტრული ველის ხანგრძლივი მოქმედების შედეგად მყარ იზოლაციაში ნომინალურ ძაბვაზე ადგილი აქვს სუსტად მიმდინარე ნაწილობრივი განმუხტვების გაძლიერებას ან ახალის წარმოქმნას, რომლებიც გადამეტაბვის იმპულსის მოქმედებით შეიძლება საშიშ დეფექტში გადაიზარდოს [7].

ტრანსფორმატორის ზეთში, რომელიც მაღალი ძაბვის საიზოლაციო სისტემის განუყოფელი ნაწილია, სხვადასხვა ზემოქმედებით აქტიურად მიმდინარეობს ზეთის დაძველების პროცესი. ამის შედეგად ზეთის თითქმის ყველა მახასიათებელი უარესდება.

აქედან გამომდინარე აუცილებელია ძალოვანი ტრანსფორმატორების მდგომარეობის პერიოდული ან უწყვეტი შეფასება-კონტროლი.

ქარხანა დამამზადებლის მიერ წარმოებული ძალოვანი ტრანსფორმატორი ობიექტზე ექსპლუატაციის წინ ყოველმხრივ შემოწმებას გადის, მაგრამ გარკვეული დროის შემდეგ მისი მახასიათებლები უარესდებიან, ამის გამო საექსპლუატაციო

ნორმატიული დოკუმენტის მოთხოვნის მიხედვით ძალოვანი ტრანსფორმატორის შემოწმების პერიოდულობა განსაზღვრულია [2]. ეს პერიოდი არ ითვალისწინებს ავარიულ ან სხვა შემთხვევებს და განმატრავს, რომ 10-12 წლის ექსპლუატაციის შემდეგ ძალოვან ტრანსფორმატორს უნდა ჩატარდეს კაპიტალური რემონტი. ამ პერიოდის განმავლობაში მას 4-6-ჯერ უტარდება სხვადასხვა მახასიათებლების შემოწმება, რის შედეგადაც ვლინდება ტრანსფორმატორის მახასიათებლების გაუარესების დინამიკა. კაპიტალური რემონტის წინ მას აუცილებლად უნდა ჩატარდეს ელექტრული გაზომვები, რასაც წინა სარემონტო გაზომვებს უწოდებენ.

საექსპლუატაციო ნორმატიული დოკუმენტის მიხედვით ძალოვან ტრანსფორმატორებს, რომელთა ნომინალური ძაბვა 110კვ-ს აღემატება ორ წელიწადში ერთხელ უტარდება ტრანსფორმატორის ზეთის შემოკლებული ანალიზი და საჭიროების შემთხვევაში შეიძლება ანალიზის რაოდენობა გაიზარდოს.

შემოკლებული ანალიზი ინფორმაციას გვაძლევს ზეთის მახასიათებლების ცვლილებების შესახებ, მაგრამ ზეთი აგრეთვე გარკვეულ ინფორმაციას ატარებს ტრანსფორმატორის აქტიურ ნაწილში მიმდინარე მოვლენების შესახებ. კერძოდ თუ ტრანსფორმატორში წარმოიქმნა ცხელი წერტილი ის აუცილებლად გამოიწვევს ზეთის მოლეკულების დაშლას. რის შედეგადაც წარმოქმნილი აირები ზეთში იხსნება და თუ ამ აირების ქრომატოგრაფიულ ანალიზს ჩავატარებთ მაშინ ზეთში გახსნილი აირების კონცენტრაციის მიხედვით შეგვიძლია განვსაზღვროთ ზეთში მიმდინარე მოვლენების ხასიათი.

ქრომატოგრაფიული ანალიზის პერიოდულობა 110კვ და მეტ მუშა ძაბვის ტრანსფორმატორებისათვის ნორმალური ექსპლუატაციის შემთხვევაში წელიწადში ორჯერ ტარდება. მაგრამ თუ რომელიმე ანალიზის დროს გამოვლინდა ტრანსფორმატორის ზეთში გახსნილი აირების კონცენტრაცია აჭარბებს ნორმას, მაშინ შექმნილი მდგომარეობიდან გამომდინარე შესაძლებელია თვეში რამოდენიმე ანალიზის ჩატარება და მიღებული შედეგებით ტრანსფორმატორის ექსპლუატაციის შეწყვეტა.

ყოველივე ზემოთ ჩამოთვლილი უმეტეს შემთხვევაში გამოავლენს ავარიის შედეგად წარმოქმნილი დაზიანების შედეგებს და არ ასახავს პარამეტრების მდგომარეობას ავარიის მომენტში ან ავარიიდან მცირე დროის შემდეგ. მიუხედავად ამისა ისინი ინფორმაციას იძლევიან დიაგნოსტიკური ანალიზის ჩასატარებლად და ტრანსფორმატორის მდგომარეობის შესაბამისად.

ტრანსფორმატორის მდგომარეობის სრული შეფასების მიზნით აუცილებელია ჩატარდეს შემდეგი სახის გაზომვები და ანალიზი:

1. ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის მახასიათებლების გაზომვა;
2. ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის მახასიათებლების გაზომვა;
3. ტრანსფორმატორის ზეთის შემოკლებული ან სრული ანალიზი;
4. ტრანსფორმატორის ზეთის ქრომატოგრაფიული ანალიზი;
5. საჭიროების შემთხვევაში ჩატარდეს ტრანსფორმატორის საიზოლაციო სისტემის ნაწილობრივი განმუხტვების გაზომვა [3];

პირველი და მეორე ანალიზი მიმდინარეობს გამორთულ ტრანსფორმატორზე რამოდენიმე დღის განმავლობაში, რაც ხშირად შეუძლებელია, ამიტომ ამ მოსაზრებიდან გამომდინარე შესაძლებელია გამოვიყენოთ კონტროლის სტაციონალური სისტემები, რომლებიც გარკვეულ ინფორმაციას მოგვცემენ ტრანსფორმატორის მდგომარეობის შესახებ.

მუშა ტრანსფორმატორიდან ექსპლუატაციის შეწყვეტის გარეშე შესაძლებელია ზეთის სინჯის აღება ქრომატოგრაფიული ანალიზის ჩასატარებლად.

ტრანსფორმატორის აქტიური ნაწილის მახასიათებლების გაზომვა მოიცავს ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენისა და დანაკარგების განსაზღვრას, ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის განსაზღვრას, მოკლედშერთვის წინააღმდეგობის განსაზღვრა და გრაგნილის წინააღმდეგობის გაზომვას მუდმივი დენის მიმართ. ყველა მათგანი გარკვეული ინფორმაციის მატარებელია.

2.6 თავი 2-ის მიმართ დასკვნები

1. ელექტრული გაზომვები ელექტროტექნიკური მოწყობილობების იმ დეფექტებს გამოავლენენ, რომლებიც ელექტრული მახასიათებლების ცვლილებასთან არის დაკავშირებული და ამ სახის გაზომვებით არაელექტრული დეფექტების გამოვლენა პრაქტიკულად შეუძლებელია.

2. უქმი სვლის დანაკარგების და ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის განსაზღვრის ცდა ძირითადად გრაგნილის ხვიებში მოკლედ შერთვის არსებობას გამოავლენს. მისი გამოვლენა თბოვიზორული გამოკვლევით პრაქტიკულად შეუძლებელია.

3. მუდმივი დენის მიმართ გრაგნილის წინაღობის განსაზღვრა ელექტრული შეერთების შესუსტებასთან (გარდამავალი წინაღობის გაზრდა) ერთად ხვიების მოკლედ შერთვის არსებობასაც გამოავლენს. თერმოგრაფიული გამოკვლევით პირველის გამოვლენა შეუძლებელია, ხოლო გარდამავალი წინაღობის გაზრდა თუ კონტაქტის გახურებას იწვევს, მაშინ მის თერმოგრაფიული გამოკვლევით აღმოჩენა ადვილად ხდება. ამასთანავე ამ სახის გამოკვლევით დეფექტის ადგილმდებარეობის ფიქსირებაც შეიძლება, რაც ელექტრული გაზომვებით ზოგჯერ შეუძლებელია.

4. საიზოლაციო სისტემის წინაღობის შემცირების ან დიელექტრიკული დანაკარგების გაზრდის მოვლენა ლოკალურ ხასიათს არ ატარებს ის ინტეგრალური მახასიათებელია და ამიტომ თერმოგრაფიული გამოკვლევით მისი გამოვლენა პრაქტიკულად შეუძლებელია.

5. ამგვარად ელექტროტექნიკური მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევა და ელექტრული გაზომვები ურთიერთ შემავსებელი მეთოდებია და დიაგნოსტიკისთვის მათი შეწყობა მოწყობილობის მდგომარეობის სრულ სურათს იძლევა.

თავი 3. სითბოგამომყოფი დეფექტები ელექტრომომწყობილობებში

3.1 სითბოს გამოყოფა ელექტრომომწყობილობებში

ნორმალური ექსპლუატაციის პირობებში, როდესაც ელექტრომომწყობილობას დეფექტი ან დაზიანება არ გააჩნია ადგილი აქვს სითბოს გამოყოფას, რომელიც ელექტრომომწყობილობის მახასიათებელი მოვლენაა. ამ შემთხვევაში სითბოს გამოყოფას სხვადასხვა ფაქტორები განაპირობებენ და გამოყოფილი სითბო მრავალი მოვლენის არსებობით არის განპირობებული.

ელექტრომომწყობილობის კონსტრუქცია და მასალა ისეა შერჩეული, რომ გამოყოფილი სითბო თითქმის მთლიანად გადაეცემა გარემოს და მოწყობილობების ტემპერატურის მატება უმნიშვნელოა.

ელექტრომომწყობილობის ნორმალური ექსპლუატაციისას სითბოს შემდეგი წყაროს არსებობაა მოსალოდნელი.

1. დატვირთვის დენის გავლით გამოყოფილი სითბო თავს იჩენს სხვადასხვა სახის ტრანსფორმატორის გრაგნილის ხვებში, დენგამტარ დეტალებში, შემაერთებელ სალტებში, კონტაქტებში და სხვა. გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა დატვირთვის დენით არის განპირობებული და შემდეგი ფორმულით გამოისახება.

$$Q = UIT = I^2Rt, \quad (15)$$

სადაც Q- გამტარში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა;

U- გამტარის ბოლოებს შორის პოტენციალთა სხვაობა;

I- დენის ძალა გამტარში;

R- გამტარის წინაღობა;

t- გამტარში დენის გავლის ხანგრძლივობა.

როგორც ვხედავთ სითბოს რაოდენობა და შესაბამისად ელექტრომომწყობილობის ტემპერატურა მთლიანად დატვირთვის დენით

არის განპირობებული, თუ მისი სიდიდე და გარემოზე სითბოს გადაცემის პირობები არ იცვლება, მაშინ ხანგრძლივი ექსპლუატაციის შემდეგ გარემოსა და ელექტრომოწყობილობის ტემპერატურას შორის თბური წონასწორობა მყარდება, ამ დამყარებულ ტემპერატურას ელექტრომოწყობილობის მუშა ტემპერატურას უწოდებენ.

განმუხტველებში სითბოს გამოყოფა გაუონვის დენით არის განპირობებული [15]. მისი სიდიდე მცირეა, მაგრამ განმუხტველის ზედაპირის ტემპერატურის ცვლილებას იწვევს. ნორმალური ექსპლუატაციის შემთხვევაში განმუხტველის ზედაპირს სიმაღლის მიხედვით თითქმის თანაბარი ტემპერატურა გააჩნია, ხოლო დეფექტის არსებობის შემთხვევას თანაბარი განაწილება ირღვევა.

2. ელექტრომოწყობილობის უქმი სვლით გამოყოფილი სითბო, თავს იჩენს მაგნიტური გულარის მქონე, ძალოვან ტრანსფორმატორებში, რეაქტორებში, ძაბვისა და დენის ტრანსფორმატორებში. მისი სიდიდე დამოკიდებული არ არის დატვირთვის რეჟიმზე, მაგრამ ძირითადად მაგნიტოგამტარის მასალის თვისებებით და რაოდენობით არის განპირობებული.

მაგნიტოგამტარის მასალის მოცულობის ერთეულის ჰისტერეზისის მარყუჟის ერთ ცვლაზე სითბოს დანაკარგი P_{n1} შემდეგი ფორმულით გამოითვლება [8].

$$P_{n1} = \eta f B_{max}^n \quad (16)$$

სადაც η - მაგნიტოგამტარის მასალის მახასიათებელი კოეფიციენტი;

B_{max} - მაქსიმალური ინდუქცია, რომელიც ჰისტერეზისის მარყუჟის ერთ ციკლზე მიიღწევა;

n - ხარისხის მაჩვენებელია, რომლის სიდიდე 1,6-დან 2-მდე იცვლება და მასალის თერმოდამუშავების რეჟიმით არის განპირობებული.

მთლიან მაგნიტოგამტარში გადამაგნიტების პროცესზე გამოყოფილი სითბო Q შემდეგი ფორმულის საშუალებით იანგარიშება.

$$P_h = \eta f B_{max}^n \cdot V \quad (17)$$

სადაც f სიხშირეა, ხოლო V მაგნიტური მასალის მოცულობა. ამასთანავე მაგნიტოგამტარში ადგილი აქვს ფუკოს დენებით განპირობებული სითბოს გამოყოფას, რომლის სიდიდე თანამედროვე ტექნოლოგიით დამზადებულ მაგნიტოგამტარებში მცირეა და სითბო თანაბრად არის განაწილებული მაგნიტოგამტარის გასწვრივ.

თუ მაგნიტოგამტარის კონსტრუქციულ ელემენტებში დენის შეკრული კონტური არ წარმოიქმნება, მაშინ მათში ფუკოს დამატებითი დენები არ აღიძვრება.

3. დიელექტრიკული დანაკარგები ყველა სახის დიელექტრიკის მახასიათებელი მოვლენაა და მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული.

დიელექტრიკებზე ელექტრული ველის მოქმედებით ელექტრული ველის ენერჯიის სითბურ ენერჯიად გარდაქმნას რის შედეგადაც დიელექტრიკი თბება, დიელექტრიკული დანაკარგების მოვლენა ეწოდება. ამ მოვლენას დიელექტრიკში მიმდინარე პოლარიზაციის და ელექტროგამტარობის პროცესები განაპირობებენ, ხოლო დიელექტრიკზე ძლიერი ელექტრული ველის ზემოქმედებისას - იონიზაციის პროცესი.

პოლარიზაციისას ბმული ნაწილაკების წანაცვლებას, განსაკუთრებით კი დიპოლთა შემობრუნებას ხელს უშლის მოლეკულარული და ხახუნის ძალები, რომელთა დაძლევაზე ელექტრული ენერჯიის გარკვეული ნაწილი იხარჯება და სწორედ ეს ნაწილი გადადის სითბოში. ასეთ დანაკარგებს პოლარიზაციულ დიელექტრიკულ დანაკარგებს უწოდებენ ($P_{პოლ}$). პოლარიზაციით გამოწვეული დიელექტრიკული დანაკარგების სიმძლავრე შემდეგი ფორმულით გამოითვლება.

$$P_{პოლ} = U^2 2\pi f C_x \operatorname{tg}\delta \quad (18)$$

სადაც U დიელექტრიკზე მოქმედი ძაბვის სიდიდეა ვოლტებში, f -გარეშე ველის სიხშირეა, C_x -გრანულიტების ტევადობაა მიწის მიმართ, ხოლო $\operatorname{tg}\delta$ -საიზოლაციო სისტემის დიელექტრიკული დანაკარგებია ავზის მიმართ. 110 კილოვოლტიანი და 40 მგვა სიმძლავრის ტრანსფორმატორისთვის $U=63500$ ვ, $C_x = 25 \cdot 10^{-9}$ ფარადს, $2\pi f = 314$, ხოლო თუ $\operatorname{tg}\delta$ -ს სიდიდეს ნორმალური მდგომარეობის ზღვრულ

მნიშვნელობას ავიღებთ $tg\delta = 0.02$. მაშინ (18) ფორმულის თანახმად ასეთ ტრანსფორმატორში სითბოს სახით პოლარიზაციით გამოწვეული დიელექტრიკული დანაკარგები $P_{პოლ} = 635$ ვატი სითბურ ენერგიას გამოყოფს.

ელექტრული ველის მოქმედებით, დიელექტრიკში მცირე სიდიდის გამჭოლი გამტარობის დენი გაედინება და ჯოულ-დენცის კანონის თანახმად სითბო გამოიყოფა, რომელსაც ელექტროგამტარობით გამოწვეულ დიელექტრიკულ დანაკარგებს უწოდებენ ($P_{გამტ}$).

ზემოთგანხილული პარამეტრების მქონე ტრ-რისთვის, როდესაც მისი საიზოლაციო სისტემის წინააღობა საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნებს აკმაყოფილებს ე.ი. $R_{იზოლ} > 600$ მეგაომს აღემატება, მაშინ ელექტროგამტარობით გამოწვეული დიელექტრიკული დანაკარგები რამოდენიმე ათეულ ვატს არ აღემატება და პოლარიზაციით გამოწვეულ დანაკარგებთან შედარებით უმნიშვნელოა.

ძლიერი ელექტრული ველის მოქმედებით დიელექტრიკში იონიზაციის პროცესი ფორმირდება. ამ მოვლენას ელექტრული ველის ენერგიის გარკვეული ნაწილი იხარჯება და მას იონიზაციით გამოწვეულ დიელექტრიკულ დანაკარგს უწოდებენ ($P_{იონ}$).

ნორმალური ექსპლუატაციის პირობებში იონიზაციის პროცესი იმდენად სუსტია, რომ იონიზაციით გამოყოფილი სითბო პრაქტიკულად ნოლის ტოლად შეიძლება ჩაითვალოს.

დიელექტრიკული დანაკარგების სრული სიმძლავრე P ამ სამი მდგენელის ჯამს წარმოადგენს:

$$P = P_{პოლ} + P_{გამტ} + P_{იონ} \quad (19)$$

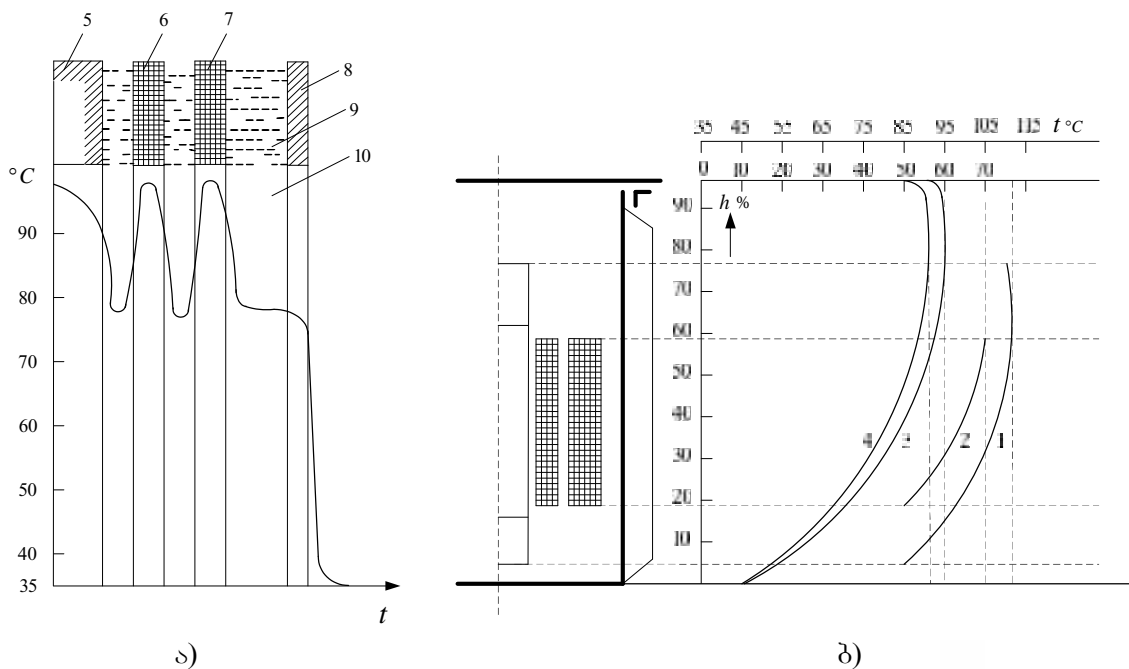
მაგრამ, ნორმალური ექსპლუატაციის პირობებში ის ძირითადად პოლარიზაციით გამოწვეული დანაკარგებით არის განპირობებული.

როგორც ზემოთ განხილულიდან ჩანს ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში ნორმალური საექსპლუატაციო რეჟიმის შემთხვევაში სითბური ენერგია დატვირთვის დენით და უქმი სვლის დანაკარგებით არის განპირობებული. ის ელექტროტექნიკურ მოწყობილობაში თანაბრად გამოიყოფა, მაგრამ ტრანსფორმატორის ზეთის სითბური

კონვექციის გამო ტემპერატურა არათანაბრად არის განაწილებული ელექტროტექნიკური მოწყობილობის სიმაღლის მიხედვით.

რადგან ავზის ზედაპირიდან სითბოგაცემას ავზის ზედაპირის ფორმა და გეომეტრია განაპირობებს ამისგამო სითბო ზედაპირზეც და ელექტროტექნიკური მოწყობილობის ცალკეულ ნაწილებზე არათანაბრად არის განაწილებული.

მუშა მდგომარეობაში მყოფი ტრანსფორმატორის სხვადასხვა ნაწილებზე ტემპერატურის განსაზღვრით აგებული იქნა ტემპერატურის (t) და ტემპერატურის მატების ავზის სიმაღლის მიხედვით განაწილების გრაფიკი (ნახ. №22) საიდანაც ჩანს, რომ ელექტრომოწყობილობის ყველა დეტალს მაქსიმალური ტემპერატურა აქტიური ნაწილის ტოლ სიმაღლეზე გააჩნია, ხოლო მინიმალური კი ავზის ძირში აქვს. ამასთანავე ყველაზე მეტი მინიმალური და მაქსიმალური ტემპერატურა მაგნიტოგამტარს აქვს. რადგან მასში თავს იყრის, როგორც უქმი სვლით გამოყოფილი, ასევე დატვირთვის დენით განპირობებული სითბოს ნაკადი, ხოლო გრაგნილში მხოლოდ დატვირთვის დენით განპირობებული სითბო. ამის გამო მას მაგნიტოგამტართან შედარებით ნაკლები ტემპერატურა აქვს.



ნახ. №22

ა-ზეთიან ტრ-რში ტემპერატურის (t) და ტემპერატურის ნამატის θ განაწილება სიმაღლის მიხედვით: ბ-ტემპერატურის განაწილება ჰორიზონტალურ კვეთში:

სადაც 1-მაგნიტოგამტარი; 2-გრაგნილი; 3-ზეთი; 4-ავზი;
5-მაგნიტოგამტარი; 6-დაბალი და 7-მაღალი ძაბვის გრაგნილები; 8-ავზის
კედელი; 9-ზეთი; 10-ჰაერი.

რაც შეეხება ტრ-რის მყარ იზოლაციას და ზეთს, როგორც ავღნიშნეთ მათში სითბოს გამოყოფა უმნიშვნელოა. ამასთანავე ზეთი სითბოგამტარობით ტრ-რის ავზის ზედაპირს გადასცემს სითბოს და კონვექციის გზით კი რადიატორების საშუალებით გარემოს გადაეცემა. მაგნიტოგამტარის ქვედა ბოლოსა და ავზის ძირს შორის სივრცეში ტემპერატურა გარემოს ტემპერატურას უტოლდება და ზეთის ბუნებრივი კონვექციის მქონე ტრანსფორმატორების ნორმალური ექსპლუატაციის შემთხვევაში ეს ზონა თბურ პროცესებში არ მონაწილეობს, მას თერმულად „მკვდარ ზონას“ უწოდებენ. ამ ზონასა და ავზის თავს შორის ტემპერატურათა სხვაობა 30 °C-მდე აღწევს, ხოლო იძულებითი გაცივების სისტემის მქონე ტრანსფორმატორში „მკვდარი ზონა“ პრაქტიკულად არ არსებობს და ავზის ძირსა და თავს შორის ტემპერატურის სხვაობა 8 °C არ აღემატება [13] ე.ი. სითბო, როგორც სიმაღლეზე ასევე კვეთის გასწვრივ თანაბრად არის განაწილებული.

ტემპერატურის ნამატი ავზში ისეთივე თანმიმდევრობით არის განაწილებული, როგორც მაქსიმალური ტემპერატურა ავზის დეტალებზე სიმაღლის მიხედვით: ხოლო ტემპერატურის ცვლილება ჰორიზონტალურ კვეთშიც ამევე კანონზომიერებას ექვემდებარება.

თუ ტრანსფორმატორის ავზში ზეთი იძულებით მოძრაობს, მაშინ ტემპერატურის აღნიშნული განაწილების სურათი მნიშვნელოვნად იცვლება, კერძოდ მაგნიტოგამტარსა და გრაგნილს შორის ტემპერატურის სხვაობა რამოდენიმე გრადუს არ ღემატება და მისი მაქსიმალური და მინიმალური ტემპერატურაც მცირედით განსხვავდება. ასეთივე სურათია ტრანსფორმატორის გრაგნილსა და ზეთს შორის და ზეთსა და ავზს შორის. ე.ი. ზეთის იძულებითი კონვექცია ტრანსფორმატორის ავზში, როგორც ტემპერატურის გათანაბრებას იწვევს, ასევე მაქსიმალური ტემპერატურის სიდიდეს ამცირებს.

გამოყოფილი სითბო გარემოს რადიატორის და ზედაპირის საშუალებით გადაეცემა. გამოყოფილ და გაცემულ სითბოს შორის სითბური ბალანსი შემდეგი ფორმულით გამოისახება:

$$P_{ავზ} = \sigma S(t_{ავზის} - t_{გარ}) \quad (20)$$

სადაც σ - ზედაპირის სითბოგაცემის კოეფიციენტია ვატი/მ². გრად.;

S-ავზის ზედაპირის ფართობი (მ²);

$t_{ავზის}$ და $t_{გარ}$ - ელექტრომოწყობილობის ავზის და გარემოს ტემპერატურებია (°C)

სითბოგაცემის კოეფიციენტის გაზრდის მიზნით აქტიური ნაწილიდან სითბოს გამომტან აგენტს ტრანსფორმატორის ზეთის გამცივებელ რადიატორში ატარებენ, რითაც არამარტო სითბოგაცემის კოეფიციენტი, არამედ ფართიც იზრდება.

ამგვარად ნორმალურ საექსპლუატაციო პირობებში ელექტრომოწყობილობაში ყოველთვის გამოიყოფა სითბო, რომელიც მოწყობილობის აქტიური ნაწილის მახასიათებელი მოვლენაა და გამოყოფილი ეს სითბო ტემპერატურის ლოკალურ მატებას არ იწვევს, ის გარემოს გაცივების სისტემის საშუალებით გადაეცემა.

3.2. სითბოს არ გამოყოფი დეფექტები ელექტრომოწყობილობებში

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ ელექტრომოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევის ძირითად მიზანს იმ დეფექტების გამოვლენა წარმოადგენს, რომლებსაც გარემოზე მეტი ტემპერატურა აქვთ. ასეთ დეფექტებში სითბო მასში დენის გავლით გამოიყოფა, მაგრამ არსებობს შემთხვევები როდესაც სითბური ბალანსი დარღვეულია და მოწყობილობის რომელიმე უბანს უფრო ნაკლები ტემპერატურა გააჩნია ვიდრე მსგავს დეტალებს. ასეთ დეფექტებს სითბოს არ გამოყოფ დეფექტს ან უბრალოდ პასიურ დეფექტს უწოდებენ.

ამ სახის დეფექტების არსებობა გამაცივებელი აგენტის (ზეთი, წყალი, აირი) მოძრაობასთან არის დაკავშირებული, რომლის დროსაც

სითბო ხელოვნური ან ბუნებრივი გაცივების საშუალებით გარემოს გადაეცემა.

როდესაც გამცივებელი აგენტის მოძრაობა შეფერხებულია ან საერთოდ ვერ მოძრაობს, ან ზედაპირიდან სხვადასხვა მიზეზით სითბო გარემოს ნაკლებად გადაეცემა, მაშინაც პასიური დეფექტი წარმოიქმნება.

პასიური დეფექტი არამარტო ტემპერატურის გაზომვით გამოვლინდება, არამედ ანალოგიური ზედაპირის ტემპერატურების შედარებით. მაგალითად ძალოვან ტრანსფორმატორის სხვადასხვა მხარეს განლაგებული გამაცივებელი რადიატორების ან თერმოსიფონური ფილტრების. მათში პასიური დეფექტის გამოსავლენად აუცილებელია იმ ზედაპირის ტემპერატურები შევადაროთ, რომლებიც ერთიდაიმავე პირობებში, კერძოდ ერთიდაიმავე სიმაღლეზე იმყოფება. ამისთვის მიღებულია შესადარებლად სითბოს წყაროდან თანაბრად დაშორებული ზედაპირების ტემპერატურები შევადაროთ, კერძოდ ტრანსფორმატორის აგზის მაქსიმალური და მინიმალური ტემპერატურის მქონე ზედაპირთან ყველაზე ახლოს (ზედა და ქვედა ფარსაკეტის მილთან) ამასთანავე მნიშვნელოვანია შედარდეს ტემპერატურები ერთიდაიმავე დონეზე (სიმაღლეზე) მყოფი ზედაპირების. ასეთი მიდგომა დეფექტების მაქსიმალურად გამოვლენის საშუალებას იძლევა.

სითბოს არგამომყოფი დეფექტის მახასიათებლის გაზომვის ან სხვა საშუალებით გამოვლენა გაძნელებულია, ის უშუალოდ ვიზუალურად უნდა დაფიქსირდეს, რაც ხშირად შეუძლებელია ან გაძნელებულია. ასეთ დეფექტზე სითბოს განაწილების შესწავლა კი საშუალებას იძლევა ელექტრომოწყობილობის ექსპლუატაციის შეწყვეტის გარეშე ეფექტურად გამოვაკლინოთ დეფექტი.

პასიური დეფექტები უმეტესად ძალოვანი ტრანსფორმატორის გაცივების სისტემაში გვხვდება, რომლის ძირითად კომპონენტს გამაცივებელი რადიატორები წარმოადგენენ. მასში შემდეგი სახის დეფექტებია მოსალოდნელი:

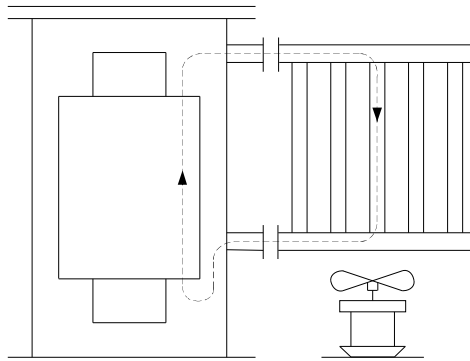
რადიატორში ზეთის შემავალი ან გამომავალი ფარსაკეტი დაკეტილია. ამ შემთხვევაში რადიატორში ზეთი არ მოძრაობს და ამ

რადიატორის ზედაპირის ტემპერატურა განსხვავებულია მეზობელი რადიატორის (რომელშიც ზეთი ნორმალურად მოძრაობს) ან ტრანსფორმატორის ავზის ზედაპირის ტემპერატურისაგან. აქ შესაძლებელია ორი შემთხვევა:

თუ ზეთის და შესაბამისად ავზის ტემპერატურა გარემოს ტემპერატურაზე მეტია, მაშინ ამ რადიატორის ზედაპირს, რომელშიც ზეთი არ მოძრაობს უფრო ნაკლები ტემპერატურა ექნება ვიდრე იმ რადიატორს, რომელშიც ზეთი მოძრაობს. ამასთანავე თუ რადიატორის ზედა ფარსაკეცია დაკეტილი, მაშინ ამ ფარსაკეცის ავზთან შემაერთებელ მილსაც იგივე ტემპერატურა ექნება, რაც რადიატორს, ხოლო ქვედა ფარსაკეცის დაკეცვის შემთხვევაში, როდესაც ზედა ფარსაკეცი გახსნილია, მაშინ ზედა ფარსაკეცის გავლით ზეთის თბილი მოლეკულები ავზთან შემაერთებელ მილში სითბური კონვექციის გზით სითბოს თითქმის მილის შუამდე გადასცემენ.

რადგან ტრანსფორმატორის ავზის ძირში მყოფი ზეთის ტემპერატურა უფრო ნაკლებია ვიდრე ავზის ზემოთ, ამის გამო ქვედა ფარსაკეცის დაკეცვის ან გახსნის შემთხვევაში აღნიშნული მოვლენა ნაკლებად გამოვლინდება და თავს იჩენს იმ შემთხვევაში თუ ზეთის ტემპერატურა 50 °C-ს აღემატება.

ორივე ფარსაკეცის დაკეცვის შემთხვევაში რადიატორის ზედაპირის ტემპერატურა თითქმის გარემოს ტემპერატურის ტოლია თუ ზეთის და შესაბამისად ავზის ტემპერატურა გარემოს ტემპერატურაზე ნაკლებია, მაშინ იმ რადიატორის ზედაპირს, რომელშიც ზეთი არ მოძრაობს უფრო მეტი ტემპერატურა ექნება ვიდრე ზეთს ან იმ რადიატორს რომელშიც ზეთი მოძრაობს. აქაც თუ რადიატორის ზედა ფარსაკეცი დაკეტილია, მაშინ ფარსაკეცის ავზთან შემაერთებელ მილს იგივე ტემპერატურა ექნება რაც რადიატორს, ხოლო ქვედა ფარსაკეცის დაკეცვის შემთხვევაში როდესაც ზედა ფარსაკეცი ღიაა, მაშინ ფარსაკეცის ტრანსფორმატორის ავზთან შემაერთებელ მილს შუა ნაწილამდე ისეთივე ტემპერატურა ექნება, როგორც რადიატორს აქვს, რაც რადიატორიდან ავზისკენ სითბოს კონვექციური მოძრაობით აიხსნება.



ნახ. №23 ტრანსფორმატორის რადიატორში ზეთის მოძრაობის სქემა

როდესაც რადიატორის ერთი ან რამოდენიმე სექცია ან გამცივებელი მილი დახშობილია და მასში ზეთი ან ცუდად მოძრაობს (ნაწილობრივ დახშობილი) ან საერთოდ არ მოძრაობს (მთლიანად დახშობილი), მაშინ სექციის ან მილის ზედაპირის ტემპერატურა და ტემპერატურის განაწილება, სიმაღლის მიხედვით მკვეთრად განსხვავდება დაუზიანებელი სექციის ანალოგიური სურათისგან.

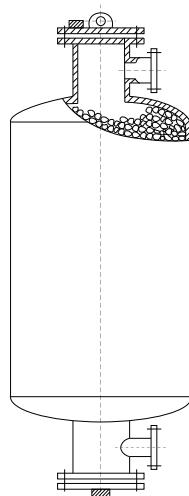
როდესაც რადიატორის ზედაპირი მტვრის ფენით არის დაფარული, რაც ხშირად მეტალურგიული და ცემენტის ქარხნების მახლობლად განლაგებულ ტრანსფორმატორებს ახასიათებთ, მაშინ რადიატორის ზედაპირიდან სითბოს გაცემა გაძნელებულია, რადიატორი ნაკლებად ეფექტურად მუშაობს. მის ქვედა ძირზე და ზედაპირზე ზეთის ტემპერატურა უფრო მეტია ვიდრე მტვრით დაუფარავი რადიატორის ზედაპირზე. ასეთი სურათი რადიატორის დეფექტს არ წარმოადგენს, მაგრამ არასასურველი მოვლენაა, მისი გამოსწორება ადვილად შესაძლებელია.

როდესაც მზე ტრანსფორმატორის ერთ მხარეს განლაგებულ რადიატორს უფრო მეტად ათბობს ვიდრე მეორეს, ან ერთი რადიატორის გაცივების ვენტილიატორი უფრო ეფექტურად მუშაობს ვიდრე მეორესი, მაშინაც რადიატორების ზედაპირების ტემპერატურა განსაზღვრული ერთიდაიმავე დონეზე (სიმაღლეზე) ერთმანეთისგან განსხვავდება, მაგრამ ეს სხვაობა რადიატორის დეფექტად არ შეიძლება ჩაითვალოს.

ზეთის იძულებითი კონვექციის შემთხვევაში, როდესაც ზეთის გამაცივებელი მოწყობილობა ტრანსფორმატორისგან დაშორებულია ზეთსავალი მილის ზედაპირის გასწვრივ, როგორც სიგრძეზე, ასევე რადიალურად, ტემპერატურის განაწილების არათანაბრობა საშუალებას იძლევა მილში არსებული დეფექტები გამოვავლინოთ. როგორც პრაქტიკამ აჩვენა ასეთი დეფექტები იშვიათია.

თუ ასეთ რადიატორთა სისტემას წყლით ან ჰაერით იძულებითი გაცივების მოწყობილობა გააჩნია, მაშინ თბომომცვლელის ზედაპირზე ტემპერატურის არამდორე (მკვეთრი) ცვლილება ან მეზობელ თბომომცვლელის ტემპერატურისგან მკვეთრი განსხვავება თბომომცვლელი ან ზეთსავალი მილის დეფექტზე მიუთითებს.

ძალოვანი ტრანსფორმატორის კონსტრუქციაში გათვალისწინებულია ტრანსფორმატორის ზეთის გამფილტრავი მოწყობილობა, რომელიც მასში მოძრავი ზეთის უწყვეტ რეგენერაციას ახდენს, რადგან ფილტრები თერმოსიფონური ეფექტის პრინციპზე მუშაობენ, ამიტომ მათ თერმოსიფონურ ფილტრებს უწოდებენ (ნახ. №24). მუშა ტრანსფორმატორში ზეთის ზედა და ქვედა ფენებს სხვადასხვა ტემპერატურა გააჩნია. ტემპერატურათა ეს სხვაობა ფილტრში ზეთის მოძრაობას განაპირობებს (თერმოსიფონური ეფექტი), რაც მეტია სხვაობა მით მეტია ზეთის მოძრაობის სიჩქარე, ზეთის მოძრაობის ხშირ შეფერხებას თერმოსიფონურ ფილტრებში აქვს ადგილი, რაც მათი კონსტრუქციული და მუშაობის თავისებურებიდან გამომდინარეობს.



ნახ. №24 თერმოსიფონური ფილტრის სქემა

კერძოდ ფილტრი შევსებულია წინასწარ გამომშრალი მსხვილმარცვლოვანი სილიკაგელით, რომლის ფოროვანი სტრუქტურა ზეთის დაძველების პროდუქტების მაღალი ადსორბციული უნარით გამოირჩევა. სილიკაგელის ფორები და ზედაპირი შთანთქავს ზეთში მყოფ ტენს, შლამს, ორგანულ მჟავებს, მეტალორგანულ შენაერთებს და ზეთის დაძველების სხვა პროდუქტებს.

სილიკაგელის მარცვლები თითქმის სფეროს ფორმის არიან და მათი დიამეტრი 2,7 მმ-დან 7,0 მმ-მდე იცვლება და თერმოსიფონურ ფილტრს იმდაგვარად ავსებენ, რომ თავისუფალი სივრცე თითქმის არ რჩება. ხანგრძლივი ექსპლუატაციის შემდეგ მარცვლებს შორის დარჩენილი მცირე ზომის თავისუფალი სივრცე ზეთის დაძველების პროდუქტებით იბიძნება და ზეთის მოძრაობა თითქმის წყდება ე.ი. ფილტრი თავის ფუნქციას არ ასრულებს. ამ შემთხვევაში ტემპერატურის ცვლილება ფილტრის სიმაღლის მიხედვით თანაბარი არ არის, კერძოდ გამართულად მუშა ფილტრში ტემპერატურა ზემოდან ქვემოთ მდორეთ მცირდება და ფილტრის ქვედა ფარსაკეტთან ავზის ტემპერატურას უტოლდება, ხოლო დაზიანებულ (გაბიძნულ) თერმოსიფონურ ფილტრში ტემპერატურის მკვეთრ შემცირებას ფილტრის შუა ან ზედა ნაწილში აქვს ადგილი, რაც ფილტრაციაში სილიკაგელის ზედა ფენების აქტიური მონაწილეობით აიხსნება. რამდენადაც მკვეთრია ზედა ფენებში ტემპერატურის შემცირება მით მეტად გაბიძნულია თერმოსიფონური ფილტრი.

როდესაც თერმოსიფონური ფილტრის ერთ-ერთი ფარსაკეტი დაკეტილია, მაშინ ტემპერატურის ცვლილების სურათი ანალოგიურია რადიატორის მსგავსი შემთხვევისა. ამასთანავე ტემპერატურის სიმაღლის მიხედვით განაწილება გამაცივებელ რადიატორში და თერმოსიფონურ ფილტრში განსხვავებულია, რაც იმით აიხსნება, რომ თერმოსიფონური ფილტრის ავზს რადიატორის მილთან შედარებით მეტი დიამეტრი და მოცულობა გააჩნია. ამასთანავე სილიკაგელის სითბოტევადობა უფრო მეტია ვიდრე ტრანსფორმატორის ზეთის.

ტრანსფორმატორის ზეთით შევსებულ ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში მნიშვნელოვანია ზეთის დონის კონტროლი,

რომლისთვისაც მათ ზეთის დონის მაჩვენებლები გააჩნიათ, რომლებიც ზოგჯერ ზეთის დონეს არასწორად აჩვენებენ ან დაზიანებული არიან.

რადგან ზეთის ტემპერატურა გარემოს ტემპერატურას აღემატება, ამიტომ თერმოგრაფიული კონტროლით ზეთის დონის გამოვლენა, ისეთ ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში, რომლებსაც ლითონის ავზი გააჩნია (ძალოვანი ტრანსფორმატორი, ზეთიანი ამომრთველი, ზოგიერთი ტიპის ძაბვის ტრანსფორმატორი, ზეთის გამაფართოებელი ავზი და სხვა) ადვილად შესაძლებელია, კერძოდ ლითონის მაღალი სითბოგამტარობის გამო ზეთის დონემდე ავზის ზედაპირის ტემპერატურა უფრო მეტია ვიდრე მის ზემოთ, ხოლო ფაიფურის გარსაცმის მქონე მოწყობილობებში, როგორცაა ძაბვისა და დენის ტრანსფორმატორები, ძაბვის შემყვანები და სხვა, ლითონთან შედარებით ფაიფურის ნაკლები სითბოგამტარობის გამო თუ ზეთის ტემპერატურა გარემოს ტემპერატურას 15 °C-ზე მეტად არ აღემატება ზეთის დონის გამოვლენა გაძნელებულია.

ამდაგვარად თერმოგრაფიული გამოკვლევა არამარტო სითბოგამომყოფი დეფექტების აღმოჩენის საშუალებას იძლევა, არამედ ის შეუცვლელია სითბოს არაგამომყოფი დეფექტების გამოსავლენად.

3.3 სითბოგამომყოფი დეფექტები ელექტრომოწყობილობებში

ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში სითბოს გამოყოფას გამტარი ნაწილის გადახურება ან საიზოლაციო სისტემაში ელექტრული იზოლაციის ლოკალური დეფექტი იწვევს.

საიზოლაციო სისტემის სითბოგამომყოფ დეფექტებს იზოლაციის მცირე მოცულობაში წარმოქმნილი ნაწილობრივი გარღვევა ან სხვადასხვა ფაქტორებით გამოწვეული დიელექტრიკული დანაკარგების ნორმაზე მეტად გაზრდა მიეკუთვნება.

იზოლაციის სრული ელექტრული გარღვევაც სითბოს ფამოყოფს, მაგრამ ის იმდენად სწრაფად მიმდინარეობს, რომ მისი ფიქსირება თბოვიზორის საშუალებით შეუძლებელია, გარღვევის შემდეგ კი ავარიას აქვს ადგილი და როგორც წესი ელექტრომოწყობილობა ექსპლუატაციიდან გამოდის.

რადგან ორგანული წარმოშობის საიზოლაციო მასალები ნაკლები სითბოგამტარობით ხასიათდებიან ვიდრე ლითონები, ამისგამო მათში გამოყოფილი სითბო გარემოს ნაკლებად გადაეცემა და სითბური დეფექტის აღმოჩენა შედარებით ადვილია. რაც შეეხება არაორგანული წარმოშობის საიზოლაციო მასალებს (ფაიფური, მინა, ქარსი და სხვა) მათ შედარებით მეტი სითბოგამტარობა გააჩნიათ, ვიდრე ორგანული წარმოშობის საიზოლაციო მასალებს, მაგრამ მათი სითბოგამტარობა ლითონების სითბოგამტარობაზე ნაკლებია.

თხევად საიზოლაციო მასალებში (სატრანსფორმატორო, საკაბელო და საკონდენსატორო ზეთებში) გამოყოფილი სითბო გარემოს კონვექციის გზით გადაეცემა. ბუნებრივი კონვექციის შემთხვევაში ცხელი წერტილიდან სითბური ნაკადი ზემოთ არის მიმართული ანუ სითბური დეფექტი მაღლა არის წანაცვლებული.

ელექტრომოწყობილობებში ნაწილობრივი განმუხტვები მყარი იზოლაციის მოცულობაში ან ზედაპირზე მიმდინარეობს. ერთჯელოვანი განმუხტვის შედეგად გამოყოფილი ენერგია მცირეა და 10^{-6} ვატს არ აღემატება, მაგრამ სიხშირე 10^7 ჰერცამდე აღწევს. თუ ეს ენერგია ზეთში მოთავსებული 5 მმ-სისქის მუყაოს იზოლაციის მოცულობაში გამოიყოფა მაშინ მისი ტემპერატურა ერთი საათის განმავლობაში $20 - 30^{\circ}\text{C}$ შეიძლება გადიდდეს. თუ ასეთი ნაწილობრივი განმუხტა მყარი იზოლაციის ზედაპირზე მიმდინარეობს მასში ტემპერატურის მატება $5 - 6^{\circ}\text{C}$ არ აღემატება, რაც გამოყოფილი სითბოს გარემოზე (ჰაერს ან ტრანსფორმატორის ზეთს) გადაცემით არის გამოწვეული.

როდესაც მყარი იზოლაციის მოცულობის მცირე ნაწილში ძირითადად დაჭუჭყიანების პროდუქტების მოცულობაში შეღწევით დიელექტრიკული დანაკარგები იზრდება, მაშინ გამოყოფილი სითბო ნაწილობრივი განმუხტვებისას წარმოქმნილი სითბოს ანალოგიური კანონზომიერებით ვრცელდება.

კაბელის იზოლაციის ნაწილობრივი დაზიანებისას, კერძოდ ცალკეული ფაზების გაშლის ადგილის იზოლაციის შესუსტების არეში თავს იჩენს ელექტროგამტარობის გაზრდით გამოწვეული დიელექტრიკული დანაკარგების ზრდა, რაც თავის მხრივ ცხელ წერტილს წარმოადგენს. სითბოს გამოყოფის გამო შეიძლება მაღალი

გამტარობის არე, ნაწილობრივ გარღვევაშიც გადაიზარდოს. ანალოგიურ მოვლენას კაბელის მოცულობაში ადგილი არ აქვს. ის კაბელის დაბოლოებების მახასიათებელი მოვლენაა და ძირითადად გამოწვეულია კაბელის იზოლაციის შესუსტებით, იზოლაციის ზედაპირზე მტვრის და ჭუჭყის ნაწილაკების მოხვედრით. ამ მოვლენას იზოლაციის ზედაპირზე წყლის ან ტენის მოხვედრა აძლიერებს.

სითბური დეფექტის ძირითად წყაროს დენგამტარი ნაწილების (დეტალების) გადახურება წარმოადგენს. ამ მოვლენას ადგილი აქვს მექანიკური შეერთებების გარდამავალი წინაღობის გაზრდისას, კერძოდ (1) ფორმულის თანახმად კონტაქტის გარდამავალი წინაღობის ნორმალურ მდგომარეობასთან შედარებით გაზრდა ამავე სიდიდით გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის გაზრდას იწვევს.

ამ მოვლენას ადგილი აქვს:

- ა- ძაბვის შემყვანების მომჭერებზე არასათანადო კონტაქტის არსებობისას;
- ბ- გამთიშველების ან ამომრთველების მოძრავ და უძრავ დანებს შორის არასათანადო კონტაქტის არსებობისას;
- გ- ტრანსფორმატორის, ავტოტრანსფორმატორის ან რეაქტორების გრაგნილების მექანიკური შეერთების ან მირჩილვის ადგილის დაზიანებისას;
- დ- ძაბვის მარეგულირებელი გადამრთველების კონტაქტებს შორის არასათანადო კავშირის არსებობისას;
- ე- მაგნიტოგამტარის დამიწების სისტემაში დენის შეკრული კონტაქტის წარმოქმნისას;
- ვ- ძალოვანი ტრანსფორმატორის ავზის შიდა ზედაპირზე განლაგებული მაგნიტური შუნტების იზოლაციის დაზიანებისას;
- ზ- ტრანსფორმატორის ავზის ძირის და ზარხუფთან შეერთების ადგილის ელექტრული კონტაქტის შესუსტებისას;
- თ- ძალოვანი ან მზომი ტრანსფორმატორის გრაგნილში მოკლედ შერთული ხვიების არსებობისას;
- ი- მაგნიტოგამტარში ცალკეულ ფურცლებს შორის იზოლაციის დაზიანებისას. ეს მოვლენა „მაგნიტოგამტარში ხანძრის“ სახელით არის ცნობილი.

როდესაც რამოდენიმე განმუხტველი ერთმანეთთან მიმდევრობით არის შეერთებული და მათ გაჟონვის დენების განსხვავებული მნიშვნელობები გააჩნიათ მაშინ ერთ-ერთ მათგანში უფრო მეტი სითბო გამოიყოფა ვიდრე სხვაში, რაც თავისებურ სითბურ დეფექტს წარმოადგენს. ასევე თუ განმუხტველის სანაპერწკლო შუალედი დაზიანებულია ან მასში წყალია მაშინ მთლიანად განმუხტველში შედარებით მეტი დენი გადის და მისი ტემპერატურა სხვა ფაზის განმუხტველთან შედარებით მეტია.

3.4 სითბოგამომყოფი დეფექტების აღმოჩენის არათბური მეთოდები

ელექტრომოწყობილობაში ნებისმიერი სახის დეფექტი, გარდა სითბური ენერჯის გამოყოფისა, გარკვეულ ცვლილებას იწვევს, რომლის საშუალებით მისი აღმოჩენა და შეფასება შესაძლებელია.

ეს ცვლილება უმეტეს შემთხვევაში ელექტრულ პარამეტრებთან არის დაკავშირებული, რომლის გამოსავლენად აუცილებელია ამ მახასიათებლის გაზომვა, რაც თავის მხრივ ელექტრომოწყობილობის გამორთვას მოითხოვს, ეს კი მომხმარებლისადმი ენერჯის შეწყვეტას იწვევს. აქედან გამომდინარე თბოვიზორული კონტროლით ელექტრომოწყობილობის დეფექტების გამოვლენა, როგორც ეკონომიურად ასევე პრაქტიკული თვალსაზრისითაც გამართლებულია.

მიუხედავად ამისა განვიხილოთ ზემოთ ჩამოთვლილი დეფექტების აღმოჩენის არასითბური მეთოდები და შევაფასოთ თბოვიზორული კონტროლის და ამ მეთოდების შესაძლებლობები.

ნაწილობრივი განმუხტვის აღმოჩენის მეთოდები იმდენად დახვეწილია, რომ საშუალებას იძლევა აღმოვაჩინოთ 1 პიკო კულონის მუხტის მქონე ერთეულოვანი განმუხტვა, მაგრამ ნაწილობრივი განმუხტვის ადგილმდებარეობის განსაზღვრა შეუძლებელია [7]. ანალოგიურ სირთულეს თბოვიზორული გამოკვლევისას აქვს ადგილი, მაგრამ თუ ნაწილობრივი განმუხტვა იზოლაციის ზედაპირზე მიმდინარეობს ან მის მიერ გამოყოფილი სითბო ავზის ზედაპირზე გამოდის, მაშინ მისი ადგილმდებარეობის განსაზღვრა შესაძლებელია.

მყარი იზოლაციის მოცულობაში დიელექტრიკული დანაკარგების გაზრდა საიზოლაციო სისტემის *tgd* ზრდაში აისახება, რომლის განსაზღვრისთვის აუცილებელია ელექტრომოწეობილობის გამორთვა და *tgd*-ის უშუალოდ ზონური მეთოდით განსაზღვრა, მაგრამ ადგილმდებარეობის ზუსტი განსაზღვრა შეუძლებელია [9]. თუ *tgd* ზრდის კერა ავზის ზედაპირზე ან მის მახლობლად იმყოფება იმდაგვარად, რომ გამოყოფილი სითბო ზედაპირზე გამოდიოდეს, მაშინ თბოვიზორული კონტროლით მისი გამოვლენა და ადგილმდებარეობის განსაზღვრა შეიძლება.

რაც შეეხება კაბელის იზოლაციის დაზიანებული უბნის გამოვლენას, ის შეიძლება გამორთული კაბელის იზოლაციის წინაღობის ან *tgd* გაზომვით აღმოვაჩინოთ, მაგრამ ამ მეთოდებით ადგილმდებარეობის განსაზღვრა პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამისთვის შეუცვლელია თბოვიზორული გამოკვლევა, რომელიც 1 მმ სიზუსტით განსაზღვრავს დაზიანებული უბნის მდებარეობას კაბელის გამორთვის გარეშე, რაც უდაოდ დიდ უპირატესობას წარმოადგენს.

დენგამტარი დეტალების მექანიკური შეერთების ან რჩილვის ადგილების გადახურება გარდამავალი წინაღობის გაზრდით არის გამოწვეული. მათი არსებობის გამოვლენა გამორთულ მოწეობილობაზე კონტაქტების წინაღობის გაზომვით გამოვლინდება. ასეთი სახის თითოეული გაზომვა ხანგრძლივი პროცესია და ყოველთვის შესაძლებელი არ არის.

თუ კონტაქტი ხილულია (გამთიშველი, ძაბვის შემყვანის, დენის და ძაბვის ტრანსფორმატორის მომჭერი) ან გამოყოფილი სითბო მოცულობიდან ავზის ზედაპირს აღწევს, მაშინ მისი თბოვიზორული გამოკვლევით ცხელი წერტილის გამოვლენა და ადგილმდებარეობის განსაზღვრა სწრაფად შეიძლება.

ტრანსფორმატორის გრაგნილების მექანიკური შეერთების დაზიანებით გრაგნილის წინაღობა მუდმივი დენის მიმართ იზრდება, მისი გამოვლენა გამორთული მოწეობილობის გრაგნილის ცალკეული ხვიების წინაღობის გაზომვით შეიძლება, მაგრამ ადგილმდებარეობის განსაზღვრა შეუძლებელია. როგორც წესი ასეთ დეფექტზე მცირე სიდიდის სითბო გამოიყოფა, რომელიც ტრანსფორმატორის ზეთს

გადაეცემა, მაგრამ ავზის ზედაპირზე არ გამოდის. ამდენად თბოვიზორული კონტროლით მისი გამოვლენა შეუძლებელია. ანალოგიურ მოვლენას აქვს ადგილი, როდესაც ძაბვის მარეგულირებელი მოწყობილობის კონტაქტებს შორის გარდამავალი წინაღობა არის გაზრდილი.

თუ ძალოვანი ტრანსფორმატორის ხვიის გამტარებს შორის მოკლედ ჩართვას აქვს ადგილი, მაშინ მისი გამოვლენა გრაგნილის ცალკეული ხვიის მუდმივი დენის მიმართ წინაღობის ან უქმი სვლის დენის და დანაკარგების სიმძლავრის გაზომვით გამოვლინდება. თუ მოკლედშერთულ კონტაქტში დიდი სიდიდის ენერგია გამოიყოფა, მაგრამ გაზური რელეს მოქმედებას ადგილი არაქვს, მაშინ გამოყოფილი სითბო ავზის ზედაპირზე გამოდის და მისი აღმოჩენა და ადგილმდებარეობის განსაზღვრა თბოვიზორული კონტროლით შესაძლებელია.

თუ ხვიების მოკლედ შერთვას მზომ ტრანსფორმატორებში აქვს ადგილი, სადაც ტრანსფორმატორის ზეთი უძრავია, გამოყოფილი სითბო სწრაფად აღწევს ტრანსფორმატორის ავზის ზედაპირს და უმეტეს შემთხვევაში მისი გამოვლენა თბოვიზორული კონტროლით შესაძლებელია.

ძალოვანი ტრანსფორმატორის შიგა ზედაპირზე განლაგებული მაგნიტური შუნტის იზოლაციის დაზიანება ელექტრული გაზომვით ძნელად გამოსაგვლენია, რადგან ავზი უნდა დაიცალოს ზეთისგან და გაზომვები ცალკეული შუნტის იზოლატორებისთვის ჩატარდეს, ხოლო თბოვიზორული კონტროლით დაზიანებული იზოლატორის მქონე შუნტის გამოვლენა ადვილად შეიძლება, რადგან მაგნიტური ნაკადის ძალწირები ავზის ზედაპირზე იკვრებიან და მის ლოკალურ გადახურებას აწვევს.

ტრანსფორმატორის ავზის ძირსა და ზარხუფს შორის ცუდი ელექტრული კონტაქტის გამოვლენა ელექტრული გაზომვებით პრაქტიკულად შეუძლებელია, მაგრამ მაგნიტურ შუნტებზე ადრული პოტენციალით განპირობებული ინდუქცირებული დენის გადინება, ცუდი კონტაქტის შეერთების ადგილის, ან მექანიკური შეერთების ქანჩის

გადახურებას იწვევს, რისი გამოვლენაც თბოვიზორული კონტროლითაა შესაძლებელი.

მაგნიტოგამტარის ცალკეულ ფურცლებს შორის იზოლაციის დაზიანებით წრმოქმნილი ფუკოს დენები მაგნიტოგამტარის გადახურებას იწვევენ. ის უქმი სვლის დანაკარგების სიმძლავრის გაზომვით გამოვლინდება. მისი ადგილმდებარეობის განსაზღვრა კი ამ მეთოდით შეუძლებელია. თუ სითბოს წყარო ტრანსფორმატორის ავზის ზედაპირთან ახლოს არის, მაშინ მის გათბობას იწვევს, მაგრამ ასეთი ადგილის თერმოგრაფიული გამოკვლევა ძნელი ჩასატარებელია.

მიმდევრობით შეერთებულ განმუხტველებში როდესაც მათი გაქონვის დენები განსხვავებულია, იმ განმუხტველში, რომელსაც მეტი წინაღობა გააჩნია მეტი სითბო გამოიყოფა და შესაბამისად ასეთი განმუხტველის გამოვლენა თბოვიზორით უფრო შესაძლებელია ვიდრე სხვა მეთოდებით.

3.5 დეფექტები ძალოვან ტრანსფორმატორებში

ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში ყველაზე მეტად დეფექტები ძალოვან ტრანსფორმატორებში გვხვდება. რომლის ანალიზი ზაპოროჟიეს ტრანსფორმატორების ქარხანამ 110კვ 106 ტრანსფორმატორისთვის 20 წლის განმავლობაში შეგროვილი 643 გამოვლენილი დეფექტის მაგალითზე ჩაატარა. ანალიზისას დეფექტები საერთო მახასიათებლის მიხედვით დააჯგუფა და განსაზღვრა ამ დეფექტების პროცენტული რაოდენობა მთლიან დეფექტებში. ჩვენ მოვახდინეთ შეფასება ამ დეფექტის თბოვიზორული დიაგნოსტიკის მეთოდით გამოვლენის შესაძლებლობის (1), არ შესაძლებლობის (0) ან ნაწილობრივად შესაძლებლობის (0,5) შეფასება. (ცხრილი №1).

	დეფექტის ადგილი და სახე	რაოდენობა	% წელი	თბოვიზორით გამოვლინდა	
1	გაცივების სისტემა	146	22.71	1	22.71
2	ძაბვის შემყვანები	92	14.31	1	14.31
3	აირების გამოყოფა ზეთში	58	9.02	0.5	4.5
4	ზეთის დაძველება	48	7.47	0	0
5	„ „ დეფექტები	46	7.15	0.5	3.55
6	ზეთის გაჟონვა	44	6.84	0.5	3.42
7	გრაგნილის მოშვება	42	6.53	0.5	3.26
8	მყარი იზოლაციის დაჭუჭყიანება	34	5.29	0	0
9	მყარი იზოლაციის დატენიანება	26	4.04	0	0
10	მაგნიტოგამტარის გაშლა	26	4.04	1	4.04
11	ზეთის გაჭუჭყიანება	14	2.18	0	0
12	გრაგნილის დეფორმაცია	10	1.56	0.5	0.78
13	იძულებითი გაცივების სისტემის დეფექტი	8	1.24	1	1.24
14	ვიბრაციის მატება	8	1.24	0	0
15	იზოლატორების დეფექტი	7	1.09	1	1.09
16	მაგნიტური შუნტების დაზიანება	6	0.93	1	0.93
17	„ „ დაზიანება	6	0.93	1	0.93
18	ზეთის დაჟანგვა	4	0.62	0	0
19	ჰერმეტიკულობის დარღვევა	4	0.62	1	0.62
20	ზეთის გამაფართოებლის დეფექტი	4	0.62	1	0.62

თუ ამ ანალიზის შედეგებით შეფასებას მოვახდენთ. აღმოჩნდება, რომ ძალოვან ტრანსფორმატორში ყველა სახის შესაძლებელი დეფექტის 62 %-ის თბოვიზორული დიაგნოსტიკის საშუალებით გამოვლენა არის შესაძლებელი, მაგრამ ამ ანალიზში ისეთი დეფექტიც არის განხილული, რომელთა გამოვლენა თბოვიზორული დიაგნოსტიკის მეთოდით, დეფექტის ბუნებიდან გამომდინარე პრაქტიკულად შეუძლებელია: მაგალითად ტრანსფორმატორის ზეთის მახასიათებლების გაუარესება ან მყარი იზოლაციის ტენშემცველობის გაზრდა. ანალიზში თუ ამ სახის დეფექტი არ გავითვალისწინეთ, მაშინ აღმოჩნდება, რომ თბოვიზორული კონტროლი საშუალებას გვაძლევს ძალოვან ტრანსფორმატორში სითბოგამყოფასთან დაკავშირებული დეფექტების 80 % გამოვავლინოთ და მათი ადგილმდებარეობა განვსაზღვროთ. ყოველივე ეს შესაძლებელია ძალოვანი ტრანსფორმატორის გამორთვის გარეშე, რაც უდავოდ მნიშვნელოვანი ფაქტორია.

3.6 თავი 3-ის მიმართ დასკვნები

ჩატარებული მსჯელობის და ანალიზის შედეგად შეგვიძლია დავასკვნათ:

1) ნებისმიერი სახის ელექტროტექნიკურ მოწყობილობაში ნორმალურ საექსპლუატაციო პირობებში ადგილი აქვს სითბოს გამოყოფას. ეს მოვლენა მისი მახასიათებელი თვისებაა, მაგრამ გამოყოფილი სითბო გარემოს გადაეცემა და სითბური დეფექტი არ წარმოიქმნება.

2) სითბური ენერჯის ყველაზე მეტ გამოყოფას ძალოვან ტრანსფორმატორებში აქვს ადგილი. მათში სითბოს ძირითად წყაროს აქტიური ნაწილი წარმოადგენს, რომელშიც გამოყოფილი სითბო ტრანსფორმატორის ზეთის და გამაცივებელი მოწყობილობების საშუალებით გარემოს გადაეცემა.

3) ელექტროტექნიკური მოწყობილობის თბური რეჟიმის ისეთ დარღვევას, რის გამოც მოწყობილობის მცირე მოცულობაში ტემპერატურა ნორმალურ პირობებთან განსხვავებულია თბური დეფექტი ეწოდება.

4) თუ თბური დეფექტი სითბოს გამოყოფით არის განპირობებული მას სითბურ ანუ აქტიურ დეფექტს უწოდებენ, ხოლო თუ დეფექტი გარემოზე სითბოგადაცემით არის განპირობებული მას სითბოარგამომყოფ ანუ პასიურ დეფექტს უწოდებენ. ასეთი დეფექტები ძირითადად ტრანსფორმატორის ავზის გაცივების სისტემაში გვხვდება.

5) თუ ტრანსფორმატორის ავზის გაცივება ბუნებრივი კონვექციით ხდება, ძალოვანი ტრანსფორმატორის ავზის სიმაღლეზე და განივკვეთის გასწვრივ სითბო არათანაბრად არის განაწილებული.

6) ელექტროტექნიკური მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევა მოწყობილობის დიაგნოსტიკის არაპირდაპირ მეთოდს წარმოადგენს, მაგრამ მისი საშუალებით შეგვიძლია ქსელიდან გამორთვის გარეშე გამოვიკვლიოთ ელექტროტექნიკური მოწყობილობები და 80 %-ზე მეტი ისეთი დეფექტი გამოვაგვლინოთ, რომლებიც ელექტროტექნიკური მოწყობილობის სითბური რეჟიმის დარღვევასთან არის დაკავშირებული.

თავი 4. ელექტროტექნიკური მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევა

4.1 თბოვიზორული გამოკვლევის ნორმები და კრიტერიუმები

მრავალწლიანმა გამოცდილებამ აჩვენა, რომ ელექტროტექნიკური მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევისას უპირატესობა ისეთ კამერებს ენიჭებათ, რომელთა მუშა სპექტრი 8-12 მიკრომეტრის ფარგლებშია, ხოლო ტემპერატურის აღქმის დასაშვები ზღვარი 0,1 °C არ აღემატება. ამასთანავე კონტროლისას გათვალისწინებული უნდა იყოს გადაღების კუთხის სწორი შერჩევა, ატმოსფეროში კვამლის ან ნისლის არარსებობა. აუცილებელია გამოსაკვლევი ობიექტის ახლოს სითბოს წყაროს ან მისგან წამოსული თბური ჰაერის ნაკადის გავლენის გამორიცხვა.

შეფასებისას ვიყენებდით მოქმედი ნორმების შესაბამის ნორმატიულ ტერმინებს, ასევე საერთაშორისო და ჩვენთან გამოყენებულ ნორმებში მიღებულ განმარტებებს.

1 ტემპერატურის ნამატი - ტემპერატურათა სხვაობა გარემოსა და გაზომილ ობიექტის ზედაპირს შორის;

2 ტემპერატურის სიჭარბე - საკონტროლო დეტალის ტემპერატურის სხვა ფაზის ნამატი ანალოგიურ დეტალის ტემპერატურაზე, როდესაც ისინი ერთნაირ გარემო პირობებში იმყოფებიან;

3 დეფექტურობის კოეფიციენტი - კონტაქტური შეერთების გაზომილი ტემპერატურის ნამატის ფარდობა, სალტის (გამტარის) დაუზიანებელი უბნის ტემპერატურის ნამატთან, რომელიც დეფექტური ადგილიდან არანაკლებ 1 მეტრ მანძილზეა დაშორებული;

4 კონტაქტი - აპარატის დენგამტარი ნაწილი, რომელიც წრედს კრავს, თიშავს ან სრიალის ან სახსროვანი შეერთებით წრედის უწყვეტობას ინარჩუნებს.

5 კონტაქტური შეერთება - დენგამტარი შეერთება (ჭანჭიკით, შედუღებით, რჩილვით ან დაწნეხვით), რომელიც ელექტრული წრედის მთლიანობას უზრუნველყოფს.

ელექტრომოწყობილობის ან ხაზის დენგამტარი ნაწილების თბური მდგომარეობის შეფასება მათი მუშაობის ან კონსტრუქციული თვისებებიდან გამომდინარე შეიძლება განხორციელდეს:

1. გახურების ნორმირებული ტემპერატურის ანუ ტემპერატურის ნამატის მიხედვით; 2. ტემპერატურის სიჭარბის მიხედვით; 3. დეფექტურობის კოეფიციენტის მიხედვით; 4. ტემპერატურის ცვალებადობის (დინამიკის) დროის მიხედვით ან დატვირთვის ცვლილების მიხედვით; 5. სხვადასხვა ფაზებზე ტემპერატურის ცვლილების მიხედვით; 6. წინასწარ ცნობილი დაუზიანებელი ფაზის (უბნის) ტემპერატურასთან შედარების მიხედვით;

ტემპერატურის ნამატის ზღვრული დასაშვები მნიშვნელობები სხვადასხვა სახის ელექტროტექნიკური მოწყობილობებისთვის მოცემულია ცხრილი №2-ში. ეს მონაცემები გამოიყენება იმ შემთხვევაში, თუ რომელიმე კონკრეტული მოწყობილობისთვის ქარხანა-დამამზადებელს ან სხვა ორგანიზაციას განსხვავებული ნორმები ან შეზღუდვები არ დაუწესებია.

ტემპერატურის ნამატის ან გაცხელების ნორმები მოყვანილია იმ შემთხვევისთვის, როდესაც მოწყობილობაში, კონტაქტში ან ტრანსფორმატორში გამავალი დენის სიდიდე ნომინალურ მნიშვნელობას უტოლდება, მაგრამ თბოვიზორული გამოკვლევის ჩატარებისას უმეტეს შემთხვევაში დატვირთვის დენის სიდიდე (*I_{დტ}*) ნომინალური მნიშვნელობისგან (*I_{ნომ}*) განსხვავდება. ამის გამო სხვადასხვა ტიპის კონტაქტების ან დეტალების თერმოგრაფიული შეფასების ჩასატარებლად სპეციალურ ფორმულებს იყენებენ.

კონტაქტზე გამოყოფილი სითბო და შესაბამისად ტემპერატურა მასში გამავალი დენის სიდიდის კვადრატის პროპორციულია. ამის გამო, ტემპერატურის ნამატის დატვირთვის დენზე დამოკიდებულებას რთული სახე აქვს. გამოთვლების გამარტივების მიზნით, დენის დიაპაზონი და შესაბამისად შეფასების კრიტერიუმი სამ ნაწილად გაყვეს.

	დასახელება	ზღვრული დასაშვები ტემპერატურა	
		გასურება	ნამატი
1	დენგამტარი და არადენგამტარი მეტალური დეტალები, არაიზოლირებული დეტალები	120	80
2	იზოლირებული დეტალები, რომლებიც ეხებიან მხურვალმდეგობის შემდეგი კლასის იზოლაციის (ГОСТ 8865-93)		
	Y კლასი	90	50
	A კლასი	100	60
	E კლასი	120	80
	B კლასი	130	90
	F კლასი	155	115
	H კლასი	180	140
3	კონტაქტები, სპილენძის ან მისი შენადნობების		
	– დაუფარავი ჰაერში/საიზოლაციო ზეთში	75/80	35/40
	– დაფარული ვერცხლით ან ნიკელით ჰაერში/ზეთში	120/90	80/50
	– დაფარული 24 მკმ სისქის ვერცხლით	120	80
	– დაფარული კალით ჰაერში/ზეთში	90/90	50/50
4	მეტალოკერამიკული კონტაქტები ვოლფრამის ან მოლიბდენის შემცველი; ზეთში სპილენძის/ან ვერცხლის ფუძით	85/90	45/50
5	აპარატული გამომყვანები სპილენძის, ალუმინის ან მათი შენადნობების, განკუთვნილი გარე გამტარებთან შესაერთებლად		
	– დაფარვის გარეშე	90	50
	– დაფარული კალით, ვერცხლით ან ნიკელით	105	65
6	ჭანჭიკით კონტაქტური შეერთება ალუმინის, სპილენძის ან მათი შენადნობების		
	– დაუფარავი ჰაერში/საიზოლაციო ზეთში	90/100	50/60
	– დაფარული კალით ჰაერში/ზეთში	105/100	65/60
	– დაფარული ვერცხლით, ნიკელით, ჰაერში/ზეთში	115/100	75/60
7	ცვლადი დენის მცველები 3კვ და მეტი ძაბვის		
	– შეერთება სპილენძის, ალუმინის ან მათი შენადნობების. ჰაერში. დაფარული/დაუფარავი	75/90	35/50
	– დაშლადი შეერთებები (ჭანჭიკით ან ხრახნით)		
	მცველების გამომყვანები	105	55
	– ზამბარიანი დაშლადი კონტაქტური შეერთებები		
	– სპილენძის დეტალები გამოყენებული როგორც ზამბარა	75	35
	– ფოსფორშემცველი ბრინჯაო ან ანალოგიური შენადნობები	70	40

8	საიზოლაციო ზეთი საკომპუტაციო აპარატის ზედა ფენებში	105	65
9	ჩაშენებული დენის ტრანსფორმატორებში		
	– გრაგნილი	–	10
	– მაგნიტოგამტარი	–	15
10	ძაბვის შემყვანებზე ჭანჭიკით		
	შეერთებები ზეთში/ჰაერში	–	85/65
11	ძალოვანი ტრანსფორმატორის დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულატორის შეერთებები სპილენძის ან მისი შენადნობებით ჰაერში/ზეთში მუშაობისას		
	– ჭანჭიკით ან სხვა ელემენტით მყარი მიბჯენისას	–	40/25
	– ზამბარით მიბჯენით, გადართვისას თვითგასუფთავებით		
	– ზამბარით მიბჯენით, გადართვისას თვითგასუფთავების გარეშე	–	35/20
12	ძალოვანი კაბელების დენგამტარი ძარღვები ხანგრძლივ/ავარიულ რეჟიმში	–	20/10
	– პოლივლინქლორიდის და პოლიეთილენის იზოლაციით	70/80	–
	– ვულკანიზირებადი პოლიეთილენის იზოლაციით	90/130	–
	– რეზინის იზოლაციით	65/–	
	– მომატებული თბომდეგობის რეზინის იზოლაციით	90/–	
	– ქაღალდის გაქვნილი იზოლაციით, ნომინალური ძაბვით		
	3 კილოვოლტამდე	80/85	
	6 კილოვოლტამდე	65/75	
	10 კილოვოლტამდე	60/–	
	20 კილოვოლტამდე	55/–	
	35 კილოვოლტამდე	50/–	
13	ელექტრული ძრავების კოლექტორების ან კოლექტორული რგოლების დაცული ან დაცვადი, რომლებსაც შემდეგი კლასის სითბომდეგობის იზოლაცია გააჩნია		
	A	–	60
	E	–	70
	B	–	80
	F	–	90
	H	–	100
14	სრიალის ან ხახუნის საკისრები	80/100	–

1. მექანიკური ან ჭანჭიკით კონტაქტური შეერთებისას, როდესაც დატვირთვის დენის სიდიდე $0,6 I_{ნომ}$ -დან $1,0 I_{ნომ}$ -მდე იცვლება შესაძლებელია ცხრილი №2-ზე მოცემული ტემპერატურის ნამატის მიხედვით კონტაქტის მდგომარეობის შეფასება, რისთვისაც შემდეგ თანაფარდობას იყენებენ.

$$\frac{\Delta T_{ტუმ}}{\Delta T_{ნომ}} = \left(\frac{I_{ტუმ}}{I_{ნომ}} \right)^2 \quad (21)$$

სადაც $\Delta T_{ნომ}$ და $\Delta T_{ტუმ}$ შესაბამისად, ნომინალურ ($I_{ნომ}$) და ($I_{ტუმ}$) დენებზე ტემპერატურებია.

ამ ფორმულიდან გამომდინარე ნორმალურ მდგომარეობაში ტემპერატურა იქნება

$$\Delta T_{ტუმ} \leq \Delta T_{ნორმ} \cdot \left(\frac{I_{ტუმ}}{I_{ნომ}} \right)^2 \quad (22)$$

თუ კონტაქტის გაზომილი ტემპერატურა ამ ფორმულით $\Delta T_{ტუმ}$ სიდიდეს აღემატება, მაშინ როგორც არ უნდა იყოს გაზომილი ტემპერატურის მნიშვნელობა, კონტაქტი დეფექტურია.

2. როდესაც კონტაქტის დატვირთვის დენის სიდიდე $0,3 I_{ნომ}$ -დან $0,6 I_{ნომ}$ -მდე იცვლება, მაშინ შეფასების კრიტერიუმად $0,5 I_{ნომ}$ დენის შესაბამისი ტემპერატურის ნამატს ($\Delta T_{0,5}$) იყენებენ, რომელიც ფორმულა (22)-ის საშუალებით განისაზღვრება.

$$\Delta T_{ტუმ} \leq \Delta T_{0,5} \left(\frac{I_{ნომ}}{0,5 I_{ნომ}} \right)^2 \quad (23)$$

ყველა შემთხვევაში ტემპერატურის ნამატის მიხედვით დაზიანება შემდეგ ეტაპებად იყოფა:

- ტემპერატურის ნამატი $5 - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ არ აღემატება - დაზიანების საწყისი ეტაპი, საჭიროა იყოს კონტროლის ქვეშ. გეგმიური რემონტისას მოხდეს მისი აღმოფხვრა.

- ტემპერატურის ნამატი 10 – 30 °C განვითარებული დეფექტი. საჭიროა მისი აღმოფხვრა ელექტრომოწყობილობის უახლოესი ექსპლუატაციიდან გამოყვანისთანავე.

- ტემპერატურის ნამატი 30 °C აღემატება - ავარიული დეფექტი, საჭიროა დაუყოვნებლივ მისი აღმოფხვრა.

მიღებულია, რომ ნებისმიერი სიდიდის დატვირთვის დენისას თუ კონტაქტური შეერთების ტემპერატურის ნამატი 30 °C აღემატება, მაშინ ადგილი აქვს ავარიულ დეფექტს და აუცილებელია მისი დაუყოვნებლივ აღმოფხვრა.

3. თუ კონტაქტის დატვირთვის დენის სიდიდე 0,3 *I_{ნომ}* ტოლი ან ნაკლებია, მაშინ თბოვიზორული გამოკვლევით ასეთი კონტაქტის დეფექტურობის შეფასება დეფექტის განვითარების საწყის ეტაპზე შეუძლებელია. ამ პირობებში ავარიული დეფექტიც კი არადეფექტური კონტაქტისგან 1 °C ტემპერატურით განსხვავდება. ლიტერატურაში გვხვდება შემთხვევა, რომ ასეთ დეფექტს ავარიულად თვლიან.

როდესაც კონტაქტური შეერთება შედუღების, რჩილვის ან მიბჯენის საშუალებით არის შექმნილი, მაშინ რეკომენდირებულია შეფასება ტემპერატურის სიჭარბის ან დეფექტურობის კოეფიციენტის საშუალებით მოვახდინოთ.

დენგამტარი დეტალების თბური მდგომარეობის შეფასება დეფექტურობის კოეფიციენტის საშუალებით წარმოებს. ამ შემთხვევაში გაზომილი ან ფორმულა (22)-ით განსაზღვრული დენგამტარის ტემპერატურას, ნორმირებული ტემპერატურის სიდიდეზე ყოფენ, რითაც დეფექტურობის კოეფიციენტი ისაზღვრება. თუ მისი სიდიდე 1-ს აღემატება, მაშინ დენგამტარი დეტალი დეფექტურია და შეფასებაც მისი სიდიდის მიხედვით წარმოებს, კერძოდ:

– თუ დეფექტურობის კოეფიციენტი 1,2-ს არ აღემატება (ანუ 1-დან 1,2-მდე იცვლება) თვლიან, რომ დაზიანების საწყისი ეტაპია, საჭიროა ობიექტი ყურადღების ქვეშ იმყოფებოდეს და დაზიანება გეგმიური რემონტის დროს აღმოიფხვრას.

– როდესაც დეფექტურობის კოეფიციენტი 1,2-დან – 1,5-მდე იცვლება, მაშინ დეფექტი განვითარებულია. მისი აღმოფხვრა უახლოეს შესაძლებლობისას არის აუცილებელი.

- თუ დეფექტურობის კოეფიციენტი 1,5-ზე მეტია ადგილი აქვს ავარიას. მისი აღმოფხვრა დაუყოვნებლივ უნდა მოხდეს.

4.2 ელექტრომოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევის პერიოდულობა

თბოვიზორული გამოკვლევის პერიოდულობაზე მრავალი ფაქტორი ახდენს გავლენას, რომელთაგან ძირითადი ამ მოწყობილობის ძაბვის კლასი, დატვირთვის სიმძლავრე, მუშაობის გარემო პირობები და ელექტრომოწყობილობის დანიშნულება.

რადგან თბოვიზორული გამოკვლევის ჩატარება მოწყობილობის ექსპლუატაციის შეწყვეტას არ მოითხოვს, ამიტომ მეტი საიმედოობის ან წინა გამოკვლევისას აღმოჩენილი დეფექტის განვითარების დინამიკის შესწავლის მიზნით შეიძლება რეკომენდირებული პერიოდულობა დაირღვეს და გამოკვლევა უფრო ხშირად ჩატარდეს, ვიდრე საექსპლუატაციო ნორმის მოთხოვნაა. რაც უდავოდ საზიანო არ არის, მაგრამ ნორმაში მითითებული პერიოდულობის გაზრდამ შეიძლება ავარია გამოიწვიოს.

ლიტერატურაში [20] ვრცელდება აზრი იმის შესახებ, რომ თბოვიზორული გამოკვლევების პერიოდულობის განმსაზღვრელი ნორმები მოძველებულია, რადგან ის 10-12 წლის წინ შეიქმნა და დღეისთვის სასურველია ასეთი გამოკვლევა წელიწადში ერთხელ მაინც ჩატარდეს. თუმცა ზოგიერთ ენერგოკომპანიებში მას წელიწადში რამოდენიმეჯერ ატარებენ.

მიუხედავად ამ მოსაზრებისა სავალდებულოა შესრულდეს თბოვიზორული გამოკვლევის ის პერიოდულობა, რომელიც საექსპლუატაციო ნორმებშია ასახული [15].

გამანაწილებელი ქვესადგურის ყველა სახის ელექტრომოწყობილობის, რომლებიც ნომინალური ძაბვის მოქმედების ქვეშ და ნორმალურ საექსპლუატაციო პირობებში იმყოფებიან, თბოვიზორული გამოკვლევის პერიოდულობას ნომინალური ძაბვა განსაზღვრავს. ნორმის მიხედვით სავალდებულოა თბოვიზორული გამოკვლევა ჩატარდეს, თუ:

ა. ნომინალური ძაბვის სიდიდე 35კვ-ს არ აღემატება არანაკლებ სამ წელიწადში ერთხელ;

ბ. ნომინალური ძაბვის სიდიდე თუ 110 კვ-დან 220 კვ-მდეა ორ წელიწადში არანაკლებ ერთხელ;

გ. როდესაც ნომინალური ძაბვის სიდიდე 300 კვ-ს აღემატება მაშინ თბოვიზორული გამოკვლევა წელიწადში ერთხელ ტარდება;

როდესაც გამანაწილებელ ქვესადგურს მუშაობა დაჭუჭყიანების ზონაში უწევს, მაშინ მიუხედავად ნომინალური ძაბვისა ქვესადგურის ყველა მოწყობილობას თბოვიზორულ გამოკვლევას წელიწადში ერთხელ ან საჭიროებისას მეტჯერ უტარებენ.

ნებისმიერი ნომინალური ძაბვის გამანაწილებელი მოწყობილობის არაგეგმიური თბოვიზორული გამოკვლევა ტარდება მასზე სტიქიური მოვლენების ზემოქმედებისას, კერძოდ ქარიშხლის, მიწისძვრის, ძლიერი ყინვების, ან გამანაწილებელი მოწყობილობის ობიექტებზე მეხის პირდაპირი დაცემისას. ასევე სავალდებულოა არაგეგმიური თბოვიზორული გამოკვლევის ჩატარება გამანაწილებელი მოწყობილობიდან გამავალ საჰაერო ან საკაბელო ელექტროგადაცემის ხაზზე მოკლედ შერთვის შემდეგ.

საჰაერო ელექტროგადაცემის ხაზის ნებისმიერი სახის კონტაქტის თბოვიზორული გამოკვლევის პერიოდულობა დამოკიდებული არ არის ნომინალური ძაბვის სიდიდეზე და მრავალი ფაქტორით არის განპირობებული კერძოდ:

– თუ გადაცემის ხაზი ექსპლუატაციაში ახალი შეყვანილია, მისი კონტაქტების თერმოგრაფიული გამოკვლევის ჩატარება სავალდებულოა ექსპლუატაციის პირველსავე წელს მოხდეს. შემდეგ კი ნორმის მიხედვით.

– როდესაც გადაცემის ხაზი ექსპლუატაციაში 25 წელზე მეტი ხნის განმავლობაში იმყოფება და წინა თბოვიზორული გამოკვლევით 5 %-ზე მეტი კონტაქტური შეერთება დეფექტური აღმოჩნდა, მაშინ თერმოგრაფიული გამოკვლევა წელიწადში ერთხელ უტარდება. თუ 5 %-ზე ნაკლები კონტაქტი აღმოჩნდა დეფექტური, მაშინ გამოკვლევის ჩატარება ნორმის მიხედვით სამ წელიწადში ერთხელ არის სავალდებულო.

- თუ ელექტროგადაცემის ხაზი მაქსიმალური დატვირთვით მუშაობს ან საპასუხისმგებლო ობიექტს აწვდის ელ.ენერგიას ან ძლიერი დატუქციანების ზონაში არის განლაგებული მაშინ მისი კონტაქტების თბოვიზორული გამოკვლევა ყოველ წელიწადს არის სავალდებულო.

- დანარჩენ შემთხვევაში ელექტროგადაცემის ხაზის კონტაქტების თბოვიზორული გამოკვლევა სავალდებულოა ექვს წელიწადში ერთხელ.

ნებისმიერი ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზზე მოკლედ შერთვის შემთხვევაში კონტაქტების თბოვიზორული გამოკვლევა რიგგარეშე ტარდება.

ელექტრომოწყობილობებზე განლაგებული ცვლადი ან მუდმივი დენის ძრავების (გამაცივებელი ვენტილატორები, ზეთის ტუმბო, ამომრთველების ძრავები და სხვა) თბოვიზორული დიაგნოსტიკის პერიოდულობა ამავე მოწყობილობის დიაგნოსტიკის პერიოდულობით განისაზღვრება, ხოლო შეფასება ხდება ცხრილი №2-ის 13 და 14 პუნქტის მოთხოვნების მიხედვით.

რადგან ჩვენი გამოკვლევის ობიექტს გენერატორები არ წარმოადგენდა ამის გამო მის ნორმებს და თბოვიზორული გამოკვლევების პერიოდულობას არ განვიხილავთ.

თბოვიზორული გამოკვლევით გამოვლენილი ნებისმიერი ძაბვის ელექტრომოწყობილობის ნებისმიერი ტიპის დეფექტის არსებობა თუ ის ავარიული არ არის ან მოწყობილობის გამორთვა ხანგრძლივი დროით შეიძლება, რემონტის ჩატარებამდე ელექტრული გაზომვით უნდა დადასტურდეს, ხოლო ავარიული ან მცირე ხნით გამორთული ხაზის შემთხვევაში რემონტი ელექტრული გაზომვების გარეშე უტარდება. ორივე შემთხვევაში გარემონტებულ ელექტრომოწყობილობას ექსპლუატაციისას თბური რეჟიმის დამყარების შემდეგ თბოვიზორული გამოკვლევა განმეორებით უტარდება.

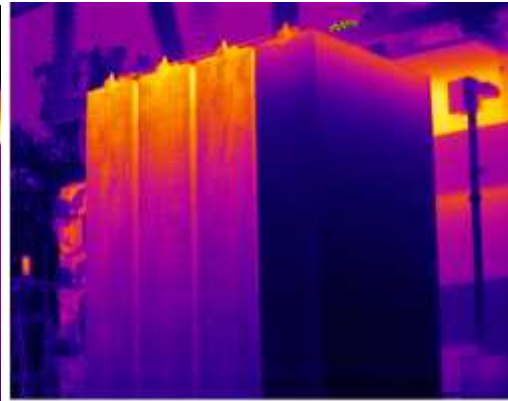
4.3 ტრანსფორმატორის გაცივების სისტემის და თერმოსიფონური ფილტრის დეფექტები

მიუხედავად იმისა, რომ ამ სახის დეფექტები სიტბოს გამოყოფით არ ხასიათდებიან მათი არსებობა სიტბური ნაკადის განაწილებაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს. ამასთანავე სხვა მეთოდებით მათი აღმოჩენა ძალიან გაძნელებულია და ამ სახის დეფექტების აღმოსაჩენად თერმოგრაფიული გამოკვლევა ფაქტიურად ერთადერთი საიმედო მეთოდია. ამის საილუსტრაციოდ ნახ. №25-ზე ნაჩვენებია ქვესადგური „ლომისი“-ს ტ-1 და ქვესადგურ „ქუთაისი-4“ ტ-1 ტრანსფორმატორების რადიატორის თერმოგრამები, საიდანაც ჩანს, რომ რადიატორის ერთ ნაწილში ტრანსფორმატორის ზეთი საერთოდ არ მოძრაობს, რაც ზეთსავალი არხების დახშობით არის გამოწვეული. ამის გამო ნომინალურ დატვირთვაზე ტრანსფორმატორის ზეთის ზედა ფენებს ნორმაზე მეტი ტემპერატურა აღმოაჩნდა.

ქ/ს „ლომისი“ ტ-1



ქ/ს „ქუთაისი-4“ ტ-1



ნახ. №25 ქვესადგური „ლომისი“-ის ტ-1 და „ქუთაისი-4“-ის ტ-1 ტრანსფორმატორების გაცივების სისტემის რადიატორების არათბური დეფექტების თერმოგრამა

ქვესადგურ „ქუთაისი-4“-ში რემონტის მიმდინარეობისას აღმოჩნდა, რომ რადიატორის ერთი სექცია ზეთის დაძველების პროდუქტებით იყო გაბიძნული. რისი აღმოფხვრის შემდეგ ტემპერატურის განაწილება სიმაღლის მიხედვით ნორმალურ საექსპლუატაციო მდგომარეობას დაუბრუნდა, ხოლო

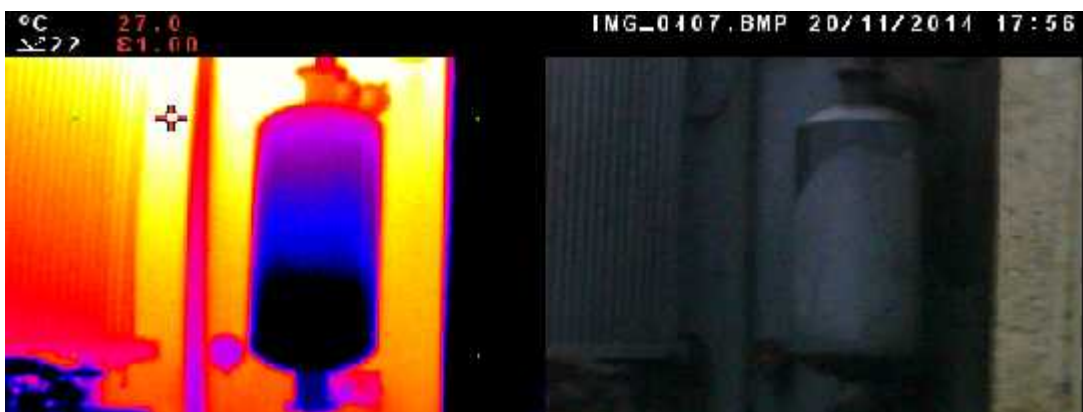
ტრანსფორმატორში ზეთის ზედა ფენების ტემპერატურის ნამატიც შემცირდა. იგივე ვითარება იყო ქ/ს „ლომისი“-ის ტრანსფორმატორის რადიატორზეც.

ქვესაღგურ „კრწანისი“ 35კვ ტრანსფორმატორის თერმოსიფონური ფილტრის ზედა ფარსაკეტი საერთოდ დაკეტილი იყო (ნახ. №26) და ფილტრის ზედაპირის ტემპერატურა გარემოს ტემპერატურას უტოლდება. ფარსაკეტის გახსნის შემდეგ მდგომარეობა შეიცვალა.



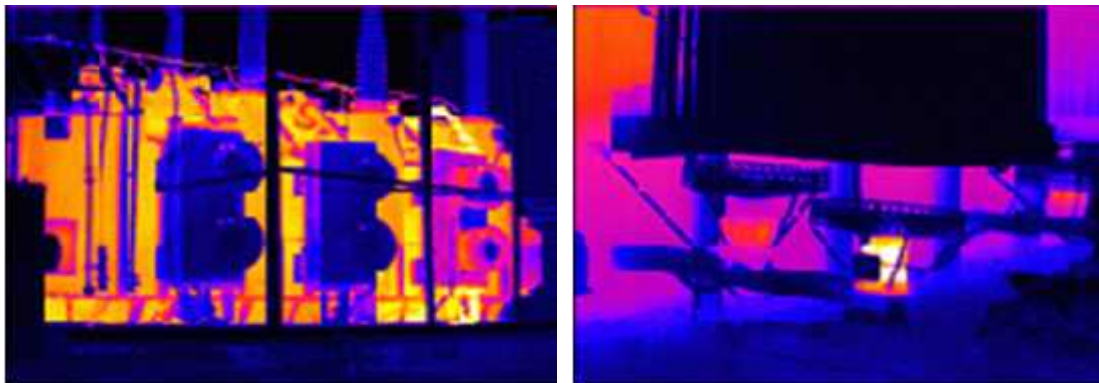
ნახ. №26 ქვესაღგური „კრწანისი“-ის ტ-2 ტრანსფორმატორის თერმოსიფონური ფილტრის თერმოგრამა

ქვესაღგური „ზუგდიდი-2“-ის თერმოსიფონური ფილტრის ზედა და ქვედა ფარსაკეტი გახსნილ მდგომარეობაში იყო, მაგრამ თვით ფილტრი იმდენად გაბიძნული იყო, რომ მასში ზეთი პრაქტიკულად არ მოძრაობდა (ნახ. №27). თერმოსიფონურ ფილტრში სილიკაგელის გამოცვლის შემდეგ დეფექტი აღმოიფხვრა.



ნახ. №27 ქვესაღგური „ზუგდიდი-2“-ის ტ-1 ტრანსფორმატორის თერმოსიფონური ფილტრის თერმოგრამა

როდესაც გაცივების სისტემის ვენტილატორის ძრავს დეფექტები გააჩნია ის თერმოგრამით ადვილად გამოვლინდება, კერძოდ თუ ძრავი არ მუშაობს (ნახ. №28 ა) მაშინ მისი ტემპერატურა გარემოს ტემპერატურას უტოლდება, ხოლო როდესაც ძრავის საკისარი დაზიანებულია, მაშინ ძრავის ტემპერატურა ნორმაზე მაღალია.



ა)

ბ)

ნახ. №28 ტრანსფორმატორის გაცივების სისტემის დეფექტები: ა)- არ მუშაობს ვენტილატორის ძრავები და ბ)- ძრავის ტემპერატურა ნორმაზე მაღალია.

4.4 მექანიკურად (ჭანჭიკით) შეერთებული კონტაქტების დეფექტები

მექანიკურად ანუ ჭანჭიკით შეერთებული კონტაქტები ძირითადად ძაბვის შემყვანი იზოლატორის, ძაბვის კონდენსატორული შემყვანის ბოლოებზე ან საკაბელო ხაზის ბოლოებზე ფაზების გამტარების მექანიკური შეერთებისას წარმოიქმნება. ასეთი შეერთებისას გარდამავალი წინაღობის გაზრდისას მასზე სითბოს გამოყოფა იზრდება და შესაბამისად კონტაქტის ტემპერატურაც. რატომუნდა გამოყოფილი სითბო კონტაქტის ირგვლივ მყოფ იზოლაციას გადაეცემა და მისი თვისებების გაუარესებას, კერძოდ თბურ დაძველებას იწვევს, რაც საბოლოოდ იზოლაციის გარღვევით მთავრდება.

ზოგჯერ მექანიკური კონტაქტი მყარ იზოლაციას არ ეხება, მაგალითად დენგამტარი სალტეები, საჰაერო გადაცემის ხაზის გამტარების ან შლექიფების მექანიკური შეერთებისას, მაგრამ გამოყოფილი სითბოს მოქმედებით კონტაქტის მასალის დაჟანგვას,

გარდამავალი წინაღობის გაზრდას და საბოლოოდ მექანიკური შეერთების დაზიანებას აქვს ადგილი.

ასეთი კონტაქტების მდგომარეობა ამავე პირობებში მყოფი მეზობელი არადეფექტური კონტაქტის ტემპერატურასთან შედარებით წარმოებს, თუ ტემპერატურათა სხვაობა ნორმას (პარაგრაფი 4.2) აღემატება, მაშინ კონტაქტი დეფექტურია.

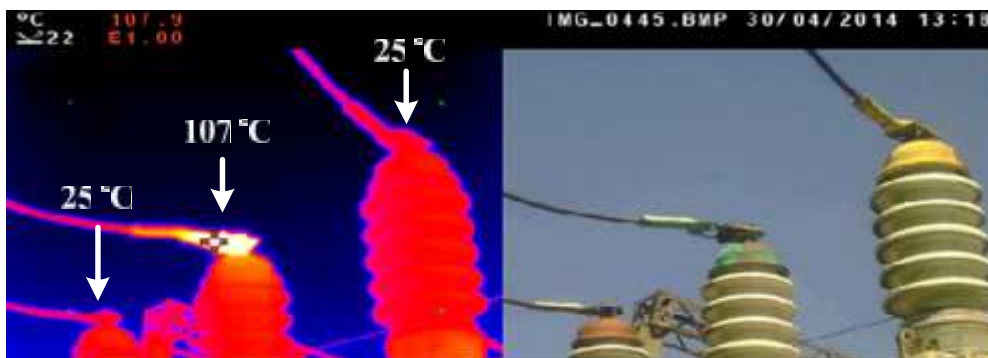
დეფექტური და არადეფექტური კონტაქტების ტემპერატურათა მაღალი სხვაობა ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) 10 კილოვოლტამდე ძაბვის შემყვანები ხასიათდებიან, რაც იმით აიხსნება, რომ მართალია საკონტაქტო ფართი შედარებით დიდია, მაგრამ ასეთ კონტაქტში დიდი სიდიდის დენი ($I > 1000\text{ ა}$) გაედინება და გარდამავალი წინაღობის მცირედ გადიდება კონტაქტზე გამოყოფილი სითბოს მნიშვნელოვან მატებას იწვევს. ამის საილუსტრაციოდ ნახ. №29-ზე მოყვანილია ქვესადგურ „საქასრია“-ს ტრანსფორმატორის 10 კილოვოლტიანი ძაბვის შემყვანების თერმოგრაფია, საიდანაც ჩანს, რომ დეფექტური კონტაქტის ტემპერატურა $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ით აღემატება არადეფექტური კონტაქტის ტემპერატურას. რემონტისას გამოვლინდა კონტაქტის არასათანადო შეერთება, რის აღმოფხვრის შემდეგ ტემპერატურის გაზომვის ცდომილებას არ აღემატებოდა.



ნახ. №29 ქვესადგურ „საქასრია“-ს 10კვ ძაბვის შემყვანი იზოლატორის დეფექტური კონტაქტის თერმოგრაფია

35კვ-იანი ძაბვის შემყვანი იზოლატორები კონსტრუქციულად იმდენად ცუდად არის დამზადებული, რომ ძაბვის შემყვანების დეფექტების უმეტესი რაოდენობა ამ სახის კონტაქტებზე მოდის.

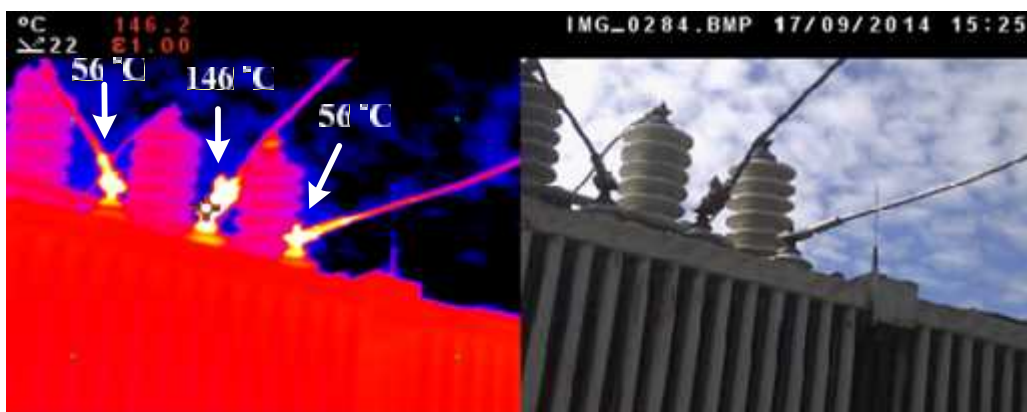
ტემპერატურათა სხვაობა კი ხშირ შემთხვევაში საკმაოდ მაღალია. ამის საილუსტრაციოდ ნახ. №30-ზე მოყვანილია ქვესადგურ „ქობულეთი“-ის 35კვ სასექციო ზ.ა-ის ძაბვის შემყვანი იზოლატორის კონტაქტური შეერთების დეფექტი, რომლის ტემპერატურა არადეფექტური კონტაქტის ტემპერატურას 82 °C-ით აღემატება.



ნახ. №30 ქვესადგური „ქობულეთი“-ის 35კვ სასექციო ზ.ა-ის ძაბვის შემყვანი იზოლატორზე დეფექტური კონტაქტის თერმოგრამა

რემონტისას არსებული დეფექტი დადასტურდა და აღმოიფხვრა.

ქვესადგური „კარაღეთი“-ის ტ-2 ტრანსფორმატორის თბოვიზორული დიაგნოსტიკისას აღმოჩნდა, რომ 10კვ ძაბვის შემყვანი იზოლატორის სამივე ფაზის კონტაქტის მექანიკური შეერთება დეფექტური იყო (ნახ. №31) ამასთან „ბ“ ფაზის კონტაქტის ტემპერატურა სხვა დეფექტური ფაზების ტემპერატურას 90 °C-ით აღემატებოდა, დეფექტურების კი გერემოსას 35 °C.

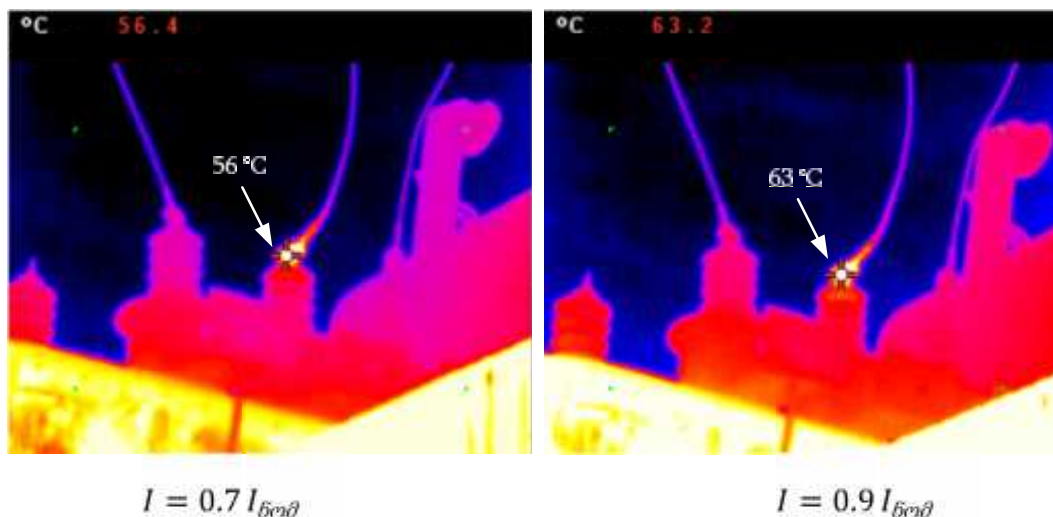


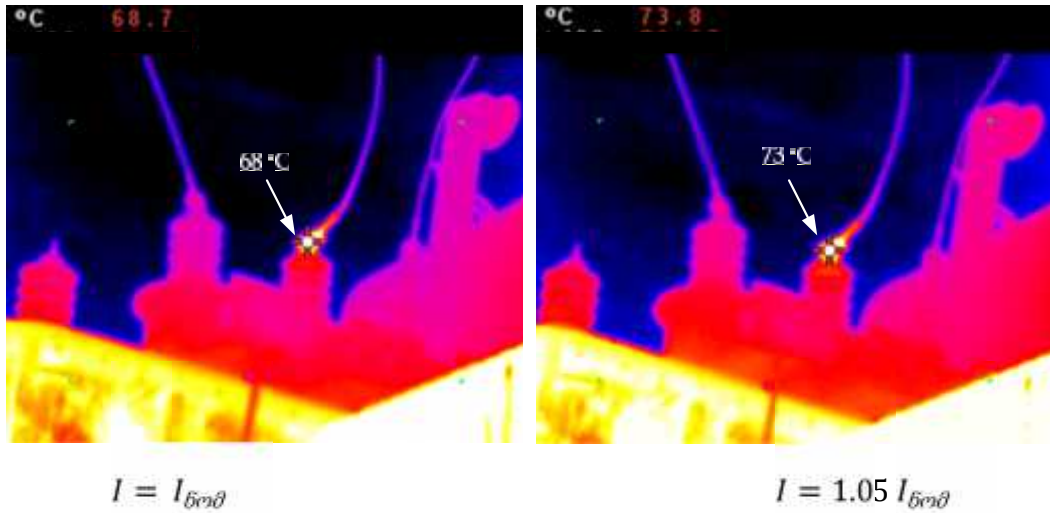
ნახ. №31 ქვესადგურ „კარაღეთი“-ის ტ-2 ტრანსფორმატორის 10კვ ძაბვის შემყვანი იზოლატორების სამივე ფაზის დეფექტური კონტაქტის თერმოგრამა

რადგან კონტაქტების ტემპერატურა დატვირთვის დენის სიდიდეზე, ქარის სიჩქარეზე, გარემოს ტემპერატურაზე, ატმოსფერულ ნალექზე და სხვა მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული. ამის გამო შევისწავლით ქვესადგურ „ფოთი-3“-ის 35კვ ტ-1 ტრანსფორმატორის „ბ“ ფაზის ძაბვის შემყვანი იზოლატორის დაზიანებული კონტაქტის ტემპერატურის სიჭარბე დაუზიანებელი ფაზის (ვ) კონტაქტის ტემპერატურასთან დატვირთვის დენის სხვადასხვა მნიშვნელობებისას (ნახ. №32) სადაც ჩანს რომ დატვირთვის დენის გაზრდით კონტაქტის ტემპერატურა თითქმის სწორხაზოვნად იზრდება (ნახ. №33), მაგრამ თუ გამოთვლებს ფორმულა №22-ის მიხედვით ჩავატარებთ, მაშინ დატვირთვის დენის გაზრდით კონტაქტის დეფექტურობის შესაფასებელი ტემპერატურა უფრო მნიშვნელოვნად იზრდება.

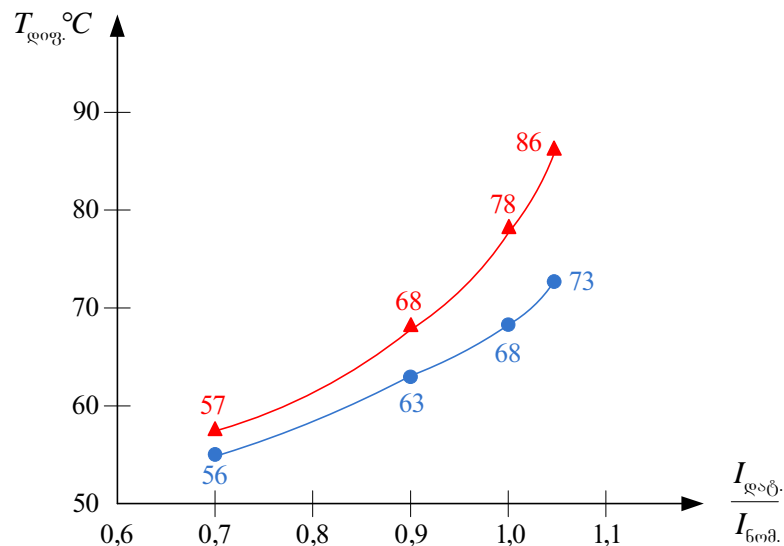
ყველა ეს გაზომვები ორ-ორი საათის ინტერვალში უქარო ამინდში ჩატარდა.

მიღებული შედეგები ცალსახად ადასტურებენ, რომ ტემპერატურის სიჭარბის გარდა კონტაქტის დეფექტურობა ნომინალურ სიმძლევრეზე (დენზე) გადაანგარიშებითაც უნდა შეფასდეს, რაც რათქმაუნდა მეტ ინფორმაციას და სიზუსტეს იძლევა.



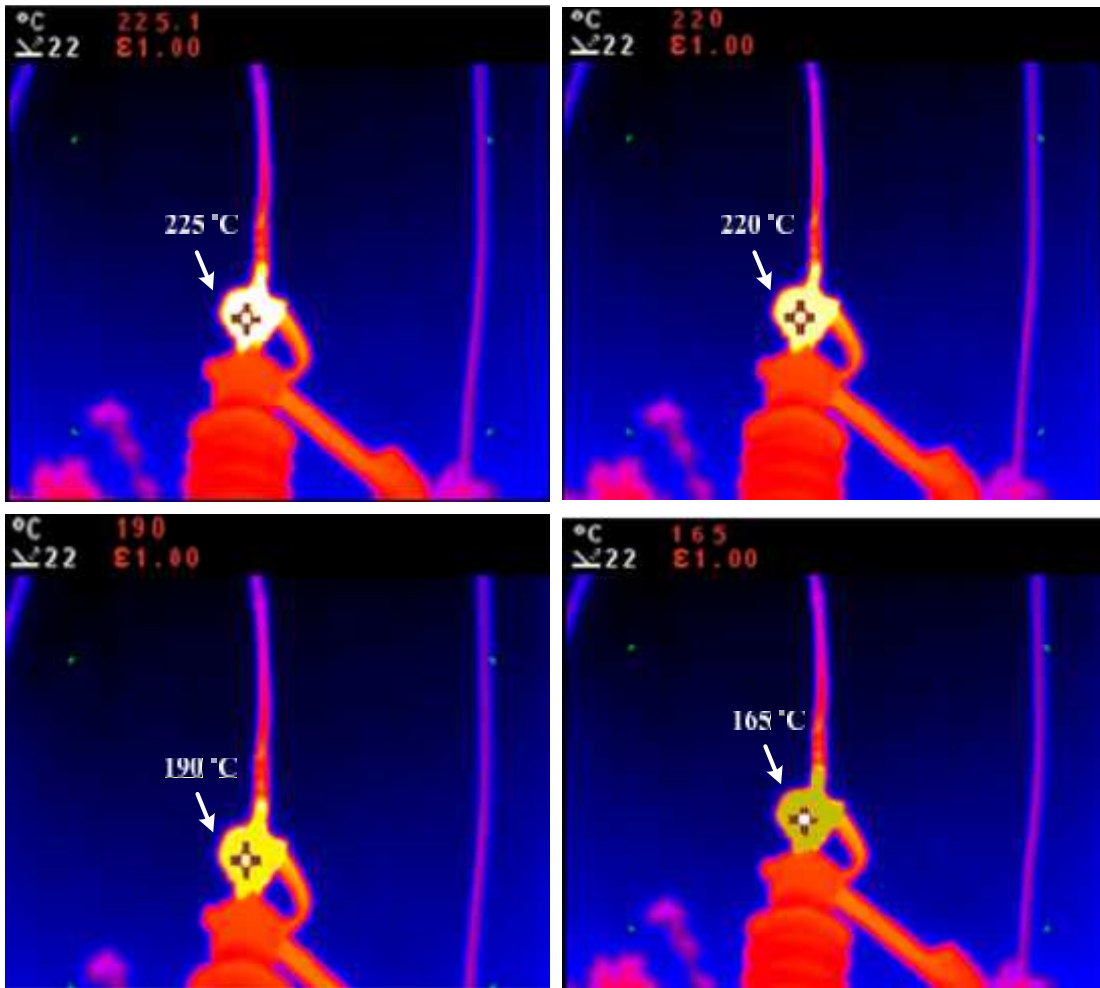


ნახ. №32 ქვესადგურ „ფოთი-3“-ის 35კვ ტ-1 ტრანსფორმატორის „ბ“ ფაზის დაბვის შემყვანის დეფექტური კონტაქტის ტემპერატურის სხვაობის ცვლილება დატვირთვის დენის სიდიდის მიხედვით



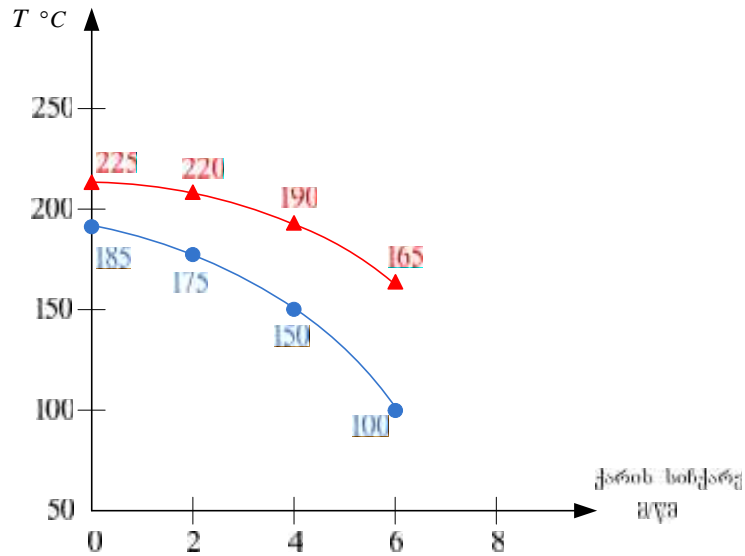
ნახ. №33 ქვესადგური „ფოთი-3“-ის ტ-1-ის 35კვ დაბვის შემყვანი იზოლატორის დაზიანებული კონტაქტის ტემპერატურის ნამატის დამოკიდებულება დატვირთვის დენის სიდიდეზე. ●- განსაზღვრული თერმოგრამით, ▲- განსაზღვრული ფორმულა №22-ით.

დეფექტური კონტაქტის ტემპერატურაზე ატმოსფერული მოვლენების გავლენის შესწავლის მიზნით განსაზღვრული იყო ქვესადგურ „ჩაქვი“-ს 110კვ სახაზო გამიშველის „ბ“ ფაზის იზოლატორის თავზე დეფექტური კონტაქტის ტემპერატურა ქარის სხვადასხვა სიჩქარისას (ნახ. №34)



ნახ. №34 ქვესადგური „ჩაქვი“-ის 110კვ ე.გ.ხ ციხისძირის სახაზო გამოთიშველის „ბ“ ფაზის იზოლატორის დეფექტური კონტაქტის თერმოგრამა, ქარის სიჩქარის სხვადასხვა მნიშვნელობისას

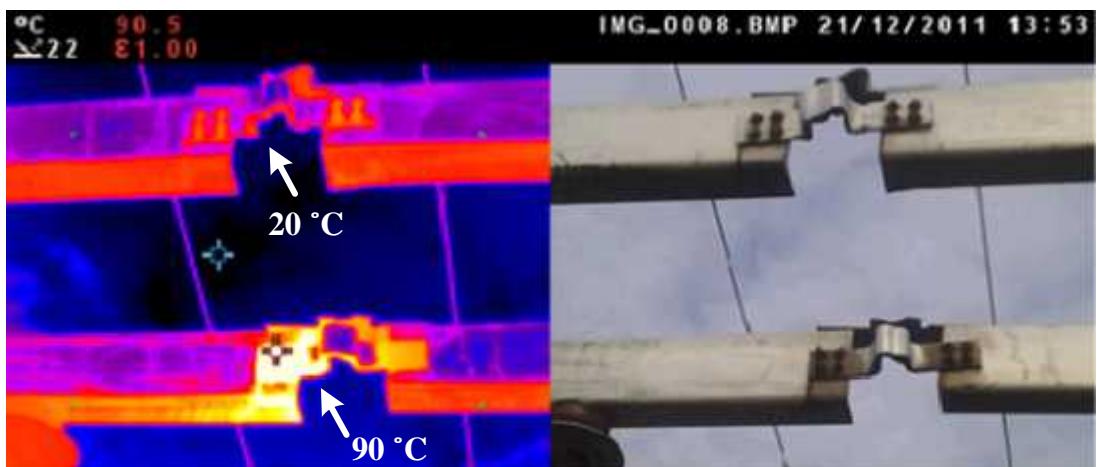
საწყის მდგომარეობაში, როდესაც ქარის სიჩქარე პრაქტიკულად ნულის ტოლი იყო, დეფექტური კონტაქტის ტემპერატურა ანალოგიური კონტაქტის ტემპერატურის სიდიდეს 185 °C-ით აღემატებოდა. ქარის სიჩქარის ზრდასთან ერთად კონტაქტის ტემპერატურის სიჭარბემ იკლო, მაგრამ მისი სიდიდე გარემოს ტემპერატურასთან შედარებით უფრო ნაკლები სიჩქარით მცირდებოდა. აქედან გამომდინარე შეიძლება ითქვას, რომ ქარიან ამინდში უფრო კარგი იქნება თუ კონტაქტის მდგომარეობა, მისი და გარემოს ტემპერატურათა სხვაობით შეფასდება.



ნახ. №35 ქვესადგურ „ჩაქვი“-ს სახაზი გამთიშველის დეფექტური კონტაქტის ტემპერატურის (▲) და ტემპერატურის ნამატის (●) დამოკიდებულება ქარის სიმძარეზე

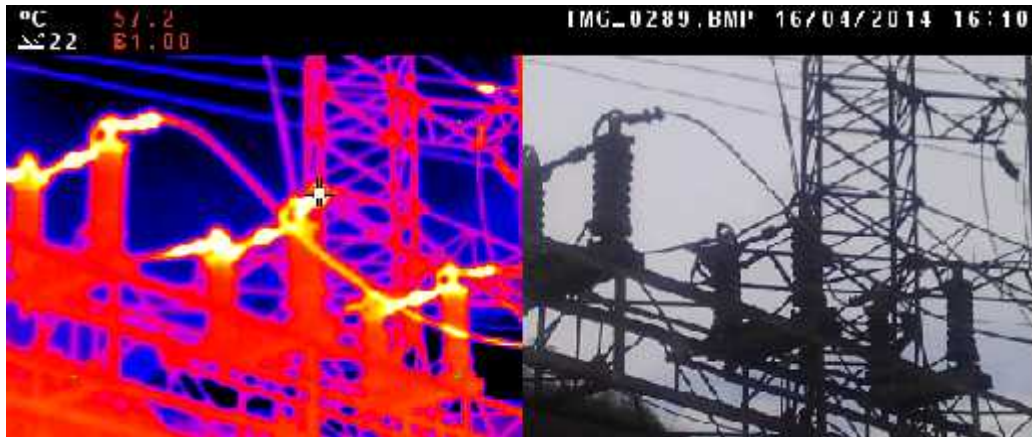
კაბელის ფაზების მექანიკურ შეერთების დეფექტი სალტებთან ზემოთგანხილულის მსგავს სურათს იძლევა და ცალკე არ განვიხილეთ.

მექანიკური შეერთების დეფექტების ერთ-ერთ სახეს არამყარად შეერთებული სალტე ან ცუდად გადაბმული გამტარები წარმოადგენს. როგორც წესი რაიმე სხვა საშუალებით მისი გამოვლენა შეუძლებელია. ამის საილუსტრაციოდ ნახ. №36-ზე მოყვანილია ქ/ს „ბათუმი-2“-ის 6 კვ სალტის შეერთების დეფექტით წარმოქმნილი ცხელი წერტილი.



ნახ. №36 ქვესადგური „ბათუმი-2“-ის 6 კვ სალტის შეერთების დეფექტის თერმოგრაფია

გამთიშველის ცუდად შეერთებული კონტაქტი უმეტეს შემთხვევაში ცხელი წერტილის წყაროს წარმოადგენს. მისი გამოვლენა მხოლოდ თერმოგრაფიული გამოკვლევით შეიძლება. ქვესადგურებში ასეთი გამთიშველების რაოდენობა მრავალია. (ნახ. №37)



ნახ. №37 ქვესადგურ „სადმელი“-ის 35კვ ე.გ.ს „ნაქერალა“-ს სახაზო გამთიშველის დაზიანებული კონტაქტების თერმოგრამა

4.5 თბური დეფექტები ელექტრომწიფობილობის იზოლაციაში

თბური დეფექტები ელექტრომწიფობილობის იზოლაციაში, ზოგჯერ იზოლაციის მახასითებლების გაზომვით ან მაღალი ძაბვით გამოცდისას გამოვლინდება, მაგრამ ასეთი გაზომვების ჩატარება ელექტრომწიფობილობის გამორთვას მოითხოვს. ამის გამო უფრო რეალურია ელექტრომწიფობილობებს პირველ რიგში თბოვიზორული გამოკვლევა ჩატარდეს და შემდეგ გამოვლენილი დეფექტების მქონე მოწყობილობებს ელექტრული გაზომვებით დაუდგინდეს დეფექტის არსებობა.

რადგან დეფექტი ელექტრომწიფობილობის მოცულობაში იმყოფება და უმეტესი საიზოლაციო მასალები ცუდი სითბოგამტარობით ხასიათდებიან, ხოლო თუ დეფექტი ზეთით შევსებულ მოწყობილობებშია, მაშინ აღნიშნულთან ერთად ზეთის თბილ მოლეკულებს სითბო ზემოთ მიაქვთ. ამიტომ ელექტრომწიფობილობის დეფექტის მახლობელ ზედაპირზე სითბოს ნამატი 20 °C არ აღემატება. ზოგჯერ კი რამოდენიმე გრადუსია.

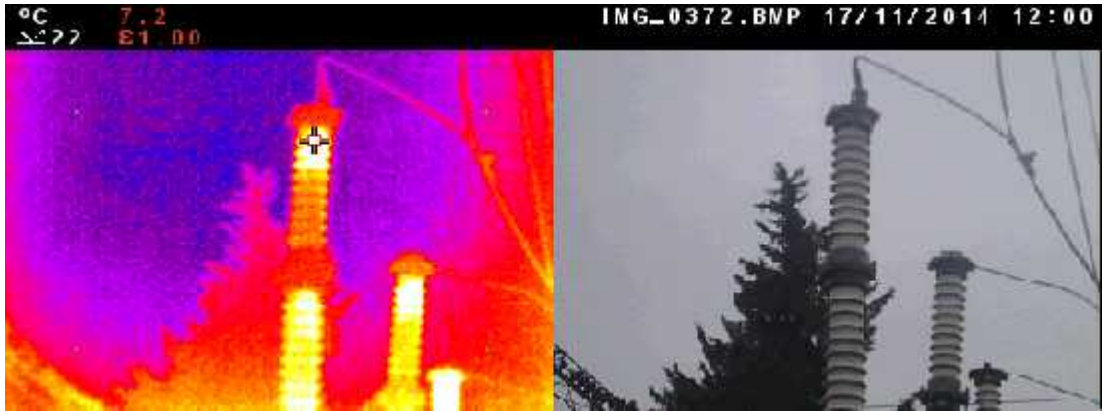
მიუხედავად იმისა, რომ უშუალოდ დეფექტის ტემპერატურა რამოდენიმე ასეული გრადუსი შეიძლება იყოს, ამის გამო ასეთი დეფექტების გამოვლენა აუცილებელია.

როდესაც საყრდენი იზოლატორის ტანში არსებულ ბზარებში ტენი აღწევს, მასში ბზარების ადგილას დიელექტრიკული დანაკარგები და შესაბამისად ტემპერატურაც იზრდება ე.ი. წარმოიქმნება ცხელი წერტილი. ასეთი ბზარები მექანიკურად ასუსტებს იზოლატორს, ხოლო ზამთარში წარმოქმნილი ყინული იზოლატორის მექანიკურ დაზიანებას იწვევს. ამ სახის დეფექტების უმრავლესობა 110 და 35 კილოვოლტიანი საყრდენ იზოლატორებში გვხვდება (ნახ. №38).



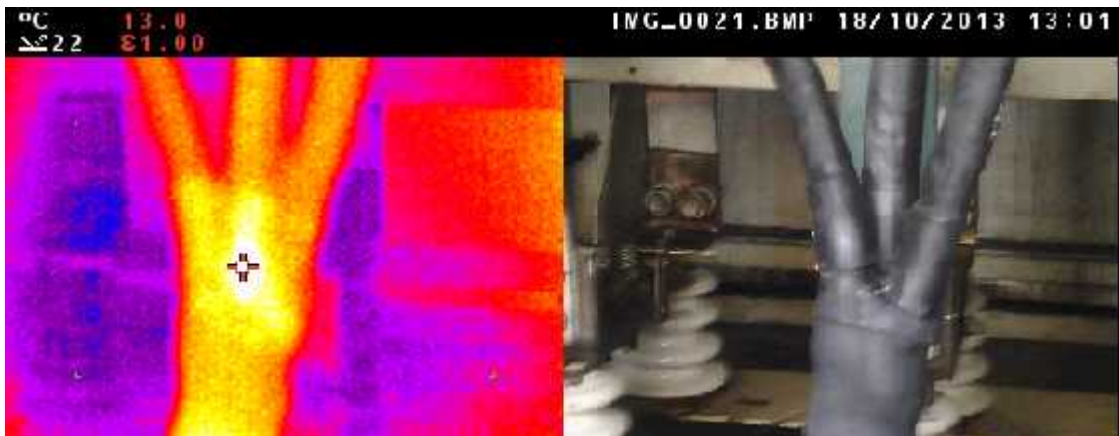
ნახ. №38 ქვესადგური „მარნეული-1“-ის 110კვ გამოთიშველის დეფექტური იზოლატორის თერმოგრაფია

მიუხედავად დეფექტის სირთულისა, მისი დაუყოვნებლივ აღმოფხვრა შეუძლებელია, რადგან ხაზის გამორთვის გარდა საჭიროა ახალი იზოლატორი. ანალოგიური მექანიზმით დეფექტები მცლელის ელემენტის ზედა ნაწილში წარმოიქმნება (ნახ. №39), ხოლო მცლელის ელემენტის ტანში ცხელი წერტილის 10 – 15 °C-მდე ტემპერატურის ნამატი განპირობებულია მცლელის ცალკეულ ელემენტებს შორის გაუონვის დენების ნორმაზე მეტი განსხვავებითა. ასეთი დეფექტი საშიშია, რადგან გადამეტაბვის იმპულსის მოქმედებით ან ზამთრის ყინვებისას მცლელი შეიძლება მექანიკურად დაზიანდეს და ავარია გამოიწვიოს.



ნახ. №39 ქს „ბოლნისი“-ის 110კვ მცლელის სექციის ტანსა და თავში არსებული ცხელი წერტილის თერმოგრაფია

მაღალი ძაბვის კაბელების ფაზებს შორის იზოლაციის დაზიანება უმეტესად კაბელის ყელში ცალკეული ფაზის გამტარების იზოლაციის ცუდი შესრულებით არის გამოწვეული (ნახ. №40). ასეთ ადგილებში სავარაუდოდ ნაწილობრივი განმუხტვა მიმდინარეობს. თუ ნაწილობრივი განმუხტვა სუსტია, მაშინ კაბელის ზედაპირზე ტემპერატურის ნამატი $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -მდეა, ხოლო მაღალი ინტენსივობის ნაწილობრივი განმუხტვისას ტემპერატურის ნამატმა $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ შეიძლება მიაღწიოს. ამ შემთხვევაში იზოლაციის დაზიანება რამოდენიმე საათში ხდება.



ნახ. №40 თბური დეფექტი ქს „ბორჯომი-1“-ის ფ. „წვეა-2“-ის კაბელის ყელში

როდესაც ძაბვის ან დენის ტრანსფორმატორის გრაგნილის ხვიებს შორის მოკლედ ჩართვას აქვს ადგილი, მაშინ ზეთის თბილი მოლეკულების მოძრაობის გამო სითბოს ნაკადი უფრო მეტად ზემოთ არის მიმართული, ვიდრე გვერდებზე (ნახ. №41). შესაბამისად დეფექტის

მაღლა ტრანსფორმატორის მოელი ტანის ტემპერატურა რამოდენიმე ათეული გრადუსით არის მომატებული, მაგრამ დეფექტის ტემპერატურა შესაძლებელია 300 – 500 °C აღემატებოდეს. ასეთი დეფექტები დაუყოვნებლივ უნდა აღმოიფხვრას.



ნახ. №41 თბური დეფექტი 110კვ ძაბვის ტრანსფორმატორის ტანში

4.6 თავ 4-ის მიმართ დასკვნები

1. თბოვიზორული დიაგნოსტიკით გამოვლენილი თბური დეფექტის საშიშროება დეფექტურობის კოეფიციენტით ფასდება, თუ მისი სიდიდე 1,2-დან 1,5-მდეა, მაშინ დეფექტი განვითარებულია. როდესაც ეს კოეფიციენტი 1,5-ს აღემატება დეფექტი ავარიულია და ის დაუყოვნებლივ უნდა აღმოიფხვრას;

2. გაცივების სისტემის დეფექტები არათბურ დეფექტებს მიეკუთვნებიან, ისინი ნაკლებად ვითარდებიან, მაგრამ საექსპლუატაციო ნორმალური მდგომარეობის დარღვევას წარმოადგენენ და მათი აღმოფხვრა აუცილებელია;

3. კონტაქტური შეერთების გარდამავალი წინაღობის გაზრდით წარმოქმნილი თბური დეფექტის ტემპერატურაზე, როგორც დატვირთვის დენის გაზრდა ასევე ქარის სიჩქარე ახდენს გავლენას, კერძოდ დენის გაზრდით ტემპერატურა იზრდება, ხოლო ქარის სიჩქარის გაზრდით კი ტემპერატურა მცირდება.

მიღებული შედეგები ცალსახად ადასტურებენ, რომ ტემპერატურის სიჭარბის გარდა კონტაქტის დეფექტურობა ნორმალურ

სიმძლავრეზე (დენზე) გადაანგარიშებითაც უნდა შეფასდეს, რაც მეტ სიზუსტეს იძლევა.

4. ელექტროსაიზოლაციო სისტემაში წარმოქმნილი თბური დეფექტები ტემპერატურის შედარებით ნაკლები ნამატით ხასიათდებიან, მაგრამ სწრაფად ვითარდებიან და საიზოლაციო სისტემის შესაქმნელად გამოყენებული მასალების დეფექტებით არიან განპირობებული.

დასკვნა

ზემოთ განხილულის ანალიზით შეგვიძლია დავასკვნათ.

1. სხეულის გამოსხივების სპექტრი მჭიდროდ არის დაკავშირებული მის ტემპერატურასთან და ინფრაწითელი სპექტრის დიაპაზონში გამოსხივების ინტენსივობის დადგენით შესაძლებელია სხეულის ტემპერატურის განსაზღვრა.

2. თბოვიზორული დიაგნოსტიკა ელექტროტექნიკური მოწყობილობებში ისეთ დეფექტებსაც გამოავლენს, რომელთა აღმოჩენა ელექტრული გაზომვებით შეუძლებელია და ამ სახის დიაგნოსტიკის ჩატარებისას განსხვავებით ელექტრული გაზომვებისგან ელექტროტექნიკური მოწყობილობის ქსელიდან გამორთვა აუცილებელი არ არის.

3. ნებისმიერი სახის ელექტროტექნიკურ მოწყობილობაში ნორმალურ საექსპლუატაციო პირობებში ადგილი აქვს სითბოს გამოყოფას. ეს მოვლენა მისი მახასიათებელი თვისებაა, მაგრამ გამოყოფილი სითბო გარემოს გადაეცემა და სითბური დეფექტი არ წარმოიქმნება.

4. სითბური ენერჯის ყველაზე მეტ გამოყოფას ძალოვან ტრანსფორმატორებში აქვს ადგილი. მათში სითბოს ძირითად წყაროს აქტიური ნაწილი წარმოადგენს, რომელშიც გამოყოფილი სითბო გარემოს გადაეცემა

5. ელექტროტექნიკური მოწყობილობების თბოვიზორული გამოკვლევა მოწყობილობის დიაგნოსტიკის არაპირდაპირ მეთოდს წარმოადგენს, მაგრამ მისი საშუალებით შეგვიძლია ქსელიდან გამორთვის გარეშე გამოვიკვლიოთ ელექტროტექნიკური მოწყობილობები და 80%-ზე მეტი ისეთი დეფექტი გამოვავლინოთ, რომლებიც ელექტროტექნიკური მოწყობილობის სითბური რეჟიმის დარღვევასთან არის დაკავშირებული.

6. თბოვიზორული დიაგნოსტიკით გამოვლენილი თბური დეფექტის საშიშროება დეფექტურობის კოეფიციენტით ფასდება, თუ მისი სიდიდე 1,2-დან 1,5-მდეა, მაშინ დეფექტი განვითარებულია.

როდესაც ეს კოეფიციენტი 1,5-ს აღემატება დეფექტი აგარიულია და ის დაუყოვნებლივ უნდა აღმოფხვრას;

7. გაცივების სისტემის დეფექტები არათბურ დეფექტებს მიეკუთვნებიან, ისინი ნაკლებად ვითარდებიან, მაგრამ ნორმალური ექსპლუატაციის მდგომარეობის დარღვევას წარმოადგენენ და მათი აღმოფხვრა აუცილებელია;

8. კონტაქტური შეერთების გარდამავალი წინაღობის გაზრდით წარმოქმნილი თბური დეფექტის ტემპერატურაზე, როგორც დატვირთვის დენის გაზრდა, ასევე ქარის სიჩქარე ახდენს გავლენას, კერძოდ დენის გაზრდით ტემპერატურა იზრდება, ხოლო ქარის სიჩქარის გაზრდით კი ტემპერატურა მცირდება.

მიღებული შედეგები ცალსახად ადასტურებენ, რომ ტემპერატურის სიჭარბის გარდა, კონტაქტის დეფექტურობა ნომინალურ სიმძლავრეზე (დენზე) გადაანგარიშებითაც უნდა შეფასდეს, რაც მეტ სიზუსტეს იძლევა.

9. ელექტროსაიზოლაციო სისტემაში წარმოქმნილი თბური დეფექტები ტემპერატურის შედარებით ნაკლები ნამატით ხასიათდებიან, მაგრამ სწრაფად ვითარდებიან და საიზოლაციო სისტემის შესაქმნელად გამოყენებული მასალების დეფექტებით არიან განპირობებული.

