

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

კახა გიორგაძე

ქვესადგურების ელექტროდინამიკისა და
ელექტრომოწყობილობების დიაგნოსტიკა დატვირთვის ქვეშ მათი
ეფექტიანობის ამაღლების მიზნით

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორ ეფერ ატი

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

თბილისი

2026 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკის ფაკულტეტი
ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელები: პროფესორი თ. მუსელიანი

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2026 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის
სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი VIII,
სხდომათა დარბაზი.

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

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

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,
პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

სამუშაოს აქტუალობა: თანამედროვე ელექტროენერგეტიკულ ინდუსტრიაში ელექტრომოწყობილობების ცვეთის მოცულობის ზრდა და მისი აღდგენის შესაძლებლობის არარსებობა ზრდის რისკს, ტექნოლოგიური ჩავარდნებსა და ავარიების ზონაში აყენებს არა მხოლოდ ელექტრომოწყობილობების, არამედ ავტომატური მართვის, რელეური დაცვისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის სისტემებს. ელექტრომოწყობილობების წარმოშვებული პრობლემების გადაჭრის ეკონომიკურმა აუცილებლობამ განაპირობა სამეცნიერო-ტექნიკური პროგრამების შემუშავება და განხორციელება, რომლებშიც ელექტროენერგეტიკული კომპლექსის განვითარების პრიორიტეტულ მიმართულებად გამოყოფილია გაცვეთილი ელექტრომოწყობილობებისა და ელექტრომოწყობილობების ექსპლუატაცია, შეკეთება, მოვლა-პატრონობა და განახლება.

ელექტროსადგურებში მომუშავე ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების მაღალი ცვეთა მოითხოვს მათი დატვირთვის ქვეშე დიაგნოსტიკის საკითხის გადაწყვეტას, რათა გაუმჯობესდეს მუშაობის ეფექტურობა, ასევე გახანგრძლივდეს მათი მომსახურების ვადა და უპრობლემოდ ეფექტური მუშაობა ელექტროსადგურების საჭირო სამუშაო რეჟიმების შექმნით.

ეს საკითხი განხილულია სამეცნიერო ნაშრომებში, სადაც ავტორები ადასტურებენ ამ სამეცნიერო მიმართულების აქტუალობას, თუმცა, მათი მეთოდები კომპლექსურად არ ითვალისწინებს ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების ტექნიკური მდგომარეობის უწყვეტი მონიტორინგის შესაძლებლობას დატვირთვის ქვეშე, მათი აღჭურვილობის ექსპლუატაციიდან ამოღების გარეშე, და ასევე არ გვთავაზობენ ყოვლისმომცველ მიდგომას არა მხოლოდ დიაგნოსტიკური პარამეტრის, არამედ ელექტროქვესადგურის სისტემაში შემავალი ელექტროდანადგარებისა და ელექტრო მოწყობილობების მუშაობის რეჟიმების ეფექტური მართვის მიმართ, რაც უზრუნველყოფს მათი მომსახურების ვადის გაზრდას.

დატვირთვის ქვეშე ძალური ქვესადგურების ელექტროდანადგარებისა და ელექტროტექნიკური მოწყობილობების მიმდინარე მდგომარეობის ზუსტი

ცოდნისა და მისი ტექნიკური მდგომარეობის პროგნოზირების აუცილებლობა განპირობებულია ეკონომიკური რეალობებით, რომლებიც დაკავშირებულია არსებული აღჭურვილობის მომსახურების ვადის გახანგრძლივების გადაუდებელ აუცილებლობასთან, ელექტროდანადგარებისა და ელექტროტექნიკური მოწყობილობების შესაცვლელად საჭირო ფინანსური რესურსების არასაკმარისობასთან და რემონტზე თანხების ეკონომიურად დახარჯვის აუცილებლობასთან.

ამიტომ, ზეთის ტემპერატურის ცვლილების, გარდამავალი ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური პროცესების, დენის და ძაბვის ჰარმონიული მდგენელების, აქტიური, ინდუქციური და ტევადური წინააღობის და იმ კანონზომიერების ცვლილება, რომლებიც გავლენას ახდენენ დატვირთვის ქვეშე მყოფი ძალური ქვესადგურების ელექტრულ ელემენტებზე აქტუალურ სამეცნიერო ამოცანას წარმოადგენს.

ნაშრომის მიზანია ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების დიაგნოსტიკა დატვირთვის ქვეშე მყოფი ელექტროქვესადგურების, მათი მომსახურების ვადის გახანგრძლივების უზრუნველყოფა ელექტროქვესადგურების მუშაობის ტემპერატურული რეჟიმის კონტროლით, ნარჩენი რესურსის წარმოქმნის პროგნოზირების გზით, რთული დიაგნოსტიკური პარამეტრის - დიელექტრული დანაკარგების კუთხის ტანგენსის საფუძველზე, გარდამავალი პროცესების მახასიათებლებისა და მათი მუშაობის რეჟიმების გათვალისწინებით, ძალური ქვესადგურების ფუნქციონირების საიმედოობისა და ეფექტურობის გაზრდის მიზნით.

კვლევის ობიექტია დატვირთვის ქვეშე მყოფი ძალური ქვესადგურების ელექტროდანადგარებისა და ელექტროტექნიკური მოწყობილობების დიაგნოსტიკა და მუშაობის რეჟიმები, მათ შორის ფუნქციონალური კავშირი და პარამეტრები.

კვლევის საგანია ძალური ქვესადგურების ელექტროდანადგარებსა და ელექტრომოწყობილობებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები, რომლებიც გავლენას ახდენენ ნარჩენი რესურსების ფორმირებაზე.

კვლევის მეთოდები - დასახული ამოცანების გადასაჭრელად გამოყენებული იქნა ელექტრომექანიკისა და ელექტროტექნიკის თეორიული საფუძვლების, რიცხვითი და მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდები, ფიზიკური სიდიდეების გაზომვის თეორია, ტექნიკური სისტემების საიმედოობის თეორია, დატვირთვის ქვეშ დიაგნოსტიკის მეთოდები, პროგნოზირების ექსტრაპოლაციის მეთოდები, ექსპერიმენტული დაგეგმვა და ოპტიმიზაციის მეთოდები.

სამეცნიერო სიახლე ჩანაცვლების ეკვივალენტური სქემების ანალიზის საფუძველზე დატვირთვის ქვეშ მყოფი ძალური ტრანსფორმატორების ელექტრული კომპონენტების დიაგნოსტიკისთვის, ელექტრული მოწყობილობების რაციონალური პარამეტრების გამოსათვლელად მიღებული იქნა ანალიზური დამოკიდებულებები ისეთი ფაქტორების გათვალისწინებით, როგორცაა ზეთის ტემპერატურის ცვლილება, გარდამავალი ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური პროცესები, დენის და ძაბვის ჰარმონიული კომპონენტები და აქტიური, ინდუქციური და ტევადობითი წინააღმდეგობები.

პრაქტიკული მნიშვნელობა. შემუშავებულია ახალი ტექნიკური გადაწყვეტილებები, რათა უზრუნველყოფილი იყოს ელექტროსადგურების ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების მუშაობის რეჟიმების უწყვეტი მონიტორინგი და კონტროლი და გაგრილების რეჟიმის რეგულირება მუშაობის პირობებში, ასევე დაგეგმილი პროფილაქტიკური მოვლა-პატრონობის პროგნოზირების მეთოდი, ელექტრო მოწყობილობებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების და ნარჩენი რესურსის ფორმირებაზე მოქმედი გარე ფაქტორების კომპლექსურად გათვალისწინებით, მათი ტექნიკური მახასიათებლების გათვალისწინებით.

სამუშაოს აპრობაცია: სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი დებულებები გამოქვეყნებულია 3 სამეცნიერო სტატიაში. ასევე 2024 წელს მოხსენებული იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტური კონფერენციაზე ინჟინერიაში ინოვაციური ტექნოლოგიების შესახებ და საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტში პირველ, მეორე, მესამე კოლოქვიუმებზე და წინასწარ დაცვაზე..

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავალისაგან, 5 თავისაგან, დასკვნისაგან, გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან. დისერტაციის საერთო მოცულობა წარმოდგენილია 141 გვერდზე და შეიცავს 44 ნახაზსა და 9 ცხრილს.

ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

შესავალში დასაბუთებულია თემის აქტუალურობა და მისი მეცნიერული სიახლე. ჩამოყალიბებულია სამუშაოს მიზანი, განსაზღვრულია კვლევის ობიექტი და კვლევისათვის გამოყენებული მეთოდები. განსაზღვრულია სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება.

ნაშრომის პირველ თავში გაანალიზებულია ელექტროსადგურებში დატვირთვის ქვეშე მყოფი ელექტრომონოწილობების კონსტრუქციული სქემები, მოდელირების მეთოდები, პარამეტრების გამოთვლის, დიაგნოსტიკისა და ტექნიკური მდგომარეობის პროგნოზირების საკითხები. ასევე დასაბუთებულია ახალი ტექნიკური გადაწყვეტილებების შემუშავების აუცილებლობა, რათა უზრუნველყოფილი იყოს ელექტროსადგურებში მუშაობის რეჟიმების უწყვეტი მონიტორინგი და კონტროლი და გაგრილების რეჟიმის რეგულირება მუშაობის პირობებში. ასევე განხილულია დაგეგმილი პროფილაქტიკური ტექნიკური მომსახურების პროგნოზირების მეთოდოლოგია, ელექტრო მონოწილობებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესებისა და მათი დარჩენილი სიცოცხლის ხანგრძლივობის ფორმირებაზე მოქმედი გარე ფაქტორების გათვალისწინებით, მათი ტექნიკური მახასიათებლების გათვალისწინებით.

დადგენილია, რომ გრაგნილი და იზოლაცია წარმოადგენს ძალური ტრანსფორმატორის ძირითად ელექტრულ კომპონენტებს, რომლებიც ყველაზე მგრძობიარენი არიან მრავალი აგრესიული ფაქტორის მიმართ და განსაზღვრავენ მის მომსახურების ვადას. წარმოდგენილია არსებული მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის მეთოდებისა და ხელსაწყოების დეტალური ანალიზი, რომელიც ცხადყოფს, რომ ისინი არ იძლევიან ტრანსფორმატორის ძირითადი კომპონენტების მდგომარეობის საჭირო სანდო ანალიზს, ძვირია და სათანადოდ არ ითვალისწინებენ ელექტრომონოწილობების მუშაობის პირობებს და მრავალრიცხოვან ზეგავლენის მქონე ოპერაციულ ფაქტორებს.

წარმოდგენილია ძალური ტრანსფორმატორების ელექტრული კომპონენტების დეფექტების კლასიფიკაცია, დალაგებული სტრუქტურული კომპონენტების მიხედვით. მითითებულია ამ დეფექტების მიზეზები და

შედეგები, ასევე არსებული დიაგნოსტიკური მეთოდები და ინსტრუმენტები. დაასკვნეს, რომ ტრანსფორმატორების მუშაობის ამჟამად არსებული დიაგნოსტიკური მეთოდები (ნაწილობრივი განმუხტვის მეთოდები, ინფრაწითელი დიაგნოსტიკა) არ იძლევა ცალკეული კომპონენტების ტექნიკური მდგომარეობის საერთო შეფასების საშუალებას, რაც ამცირებს ტრანსფორმატორის საერთო ტექნიკური მდგომარეობის რაოდენობრივ და თვისებრივ შეფასებას. შესაბამისად, შეიძლება დავასკვნათ, რომ ძალური ტრანსფორმატორის მდგომარეობის დიაგნოსტიკური პარამეტრები, როგორცაა გრაგნილების აქტიური, ინდუქციური და ტევადობის წინააღობები, არასაკმარისად არის შესწავლილი და არასაკმარისად გამოიყენება.

ნაშრომის მეორე თავი განსაზღვრავს რთული დიაგნოსტიკური პარამეტრის - დიელექტრული დანაკარგის კუთხის ტანგენსის - გამოთვლის დამოკიდებულებებს, გარდამავალი პროცესებისა და მუშაობის რეჟიმების მახასიათებლების გათვალისწინებით, ელექტროსადგურების საიმედოობისა და ეფექტურობის გასაუმჯობესებლად.

ელექტრო მოწყობილობებისა და მოწყობილობების დენის გამტარი ნაწილების ნარჩენი სიცოცხლის ხანგრძლივობის შეფასება და მიმდინარე მდგომარეობის დახვეწა ხორციელდება შემდეგი თანმიმდევრობით:

ა) დაბერების მოდელის რიცხვითი ამოხსნით შემდეგი დიფერენციალური განტოლების სახით, რომელიც ეხება დენის გამტარ ნაწილების იზოლაციის ტემპერატურას (1) საწყისი მონაცემების მთელი ნაკრების გამოყენებით, შესრულდება დაბერების პროცესის მათემატიკური მოდელირება და განისაზღვრება მისი სავარაუდო სიცოცხლის ხანგრძლივობა (τ), ანუ დრო ექსპლუატაციაში გაშვებიდან საბოლოო (გაფუჭების) მდგომარეობის მიღწევამდე;

$$\frac{d\theta}{dt} = \alpha_0 \cdot \exp[\gamma \cdot \theta(t)] \cdot \frac{\theta(t) - Z(t) - v \cdot \gamma(t)}{1 - \xi \cdot [\theta(t) - Z(t) - v \cdot \gamma(t)]} + \frac{dz}{dt} X$$

$$X = \frac{1}{1 - \xi \cdot [\theta(t) - Z(t) - v \cdot \gamma(t)]} + \frac{[\theta(t) - Z(t)] \frac{d\gamma}{dt}}{[1 - \xi \cdot [\theta(t) - Z(t) - v \cdot \gamma(t)] \cdot \gamma(t)} \quad (1)$$

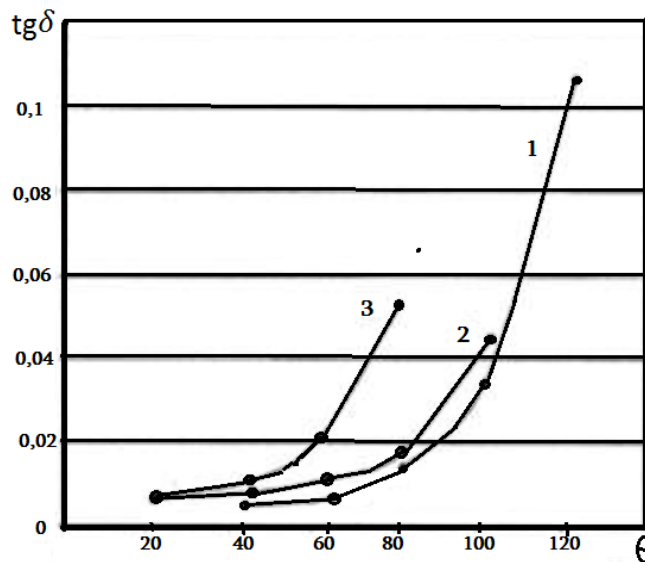
ბ) განისაზღვრება სავარაუდო ექსპლუატაციის ვადის მგრძობილობა საწყისი მონაცემების მიმართ;

გ) დარჩენილი ექსპლუატაციის ვადა (τ_r) შეფასებულია, როგორც სხვაობა სავარაუდო ექსპლუატაციის ვადასა და ექსპლუატაციის დროს, ანუ ექსპლუატაციის პერიოდის ხანგრძლივობა პროგნოზირების დროს (T):

$$\tau_r = \tau - T \quad (2)$$

გამოთვლის ალგორითმი შექმნილია ისე, რომ tგდ გამოითვლება ტემპერატურასთან ერთდროულად (სურ. 1).

ელექტროსადგურებში ელექტრომოწყობილობებისა და ელექტრომოწყობილობების მუშაობის დროს ტემპერატურული გარემოს ფორმირების დასადგენად ჩატარდა განაწილებული პარამეტრების მქონე ობიექტის მოდელირება.



ნახ.1. tგდ-ს დამოკიდებულება θ ტემპერატურაზე t ნიმუშის 135°C გრადუსის დროს დაძველების დროის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს

ობიექტი აღწერილია მეორე რიგის ნაწილობრივი დიფერენციალური განტოლებით - ე.წ. სითბოს გამტარობის განტოლებით ან ფურიეს განტოლებით

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \Delta T \quad (3)$$

სადაც a არის თბოგამტარობის კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია გარემოს ფიზიკურ თვისებებზე და გამოსახულება:

$$\Delta T = \frac{dT^2}{dx^2} + \frac{dT^2}{dy^2} + \frac{dT^2}{dz^2} \quad (4)$$

არის ლაპლასის ოპერატორი დეკარტეს კოორდინატთა სისტემაში ტემპერატურის ველის განსაზღვრის სამგანზომილებიანი სივრცითი არესათვის $T=T(x,y,z,t)$.

განსაზღვრულია დამოკიდებულებები დატვირთვის ქვეშ მყოფი ელექტრომოწყობილობებისა და ელექტრომოწყობილობების დიაგნოსტიკის, მონიტორინგისა და კონტროლის ყოვლისმომცველი სისტემის გენერირების მოწყობილობის ელემენტების პარამეტრების გამოსათვლელად. დამზოგავი მოწყობილობა შეირჩევა მის მიერ მომარაგებული მომხმარებლების საერთო სიმძლავრის საფუძველზე. საზომი და გენერირების გრაგნილების პარამეტრები გამოითვლება საჭირო მგრძნობელობის დონის გათვალისწინებით, რომელიც გამოიხატება მაგნიტური ინდუქციის მინიმალური სხვაობით, რომელიც შეირჩევა სამუშაო გარემოში მინიმალური ტემპერატურული სხვაობის საფუძველზე, რომლის დროსაც რეგულირდება ვენტილატორული დანადგარის სიჩქარე.

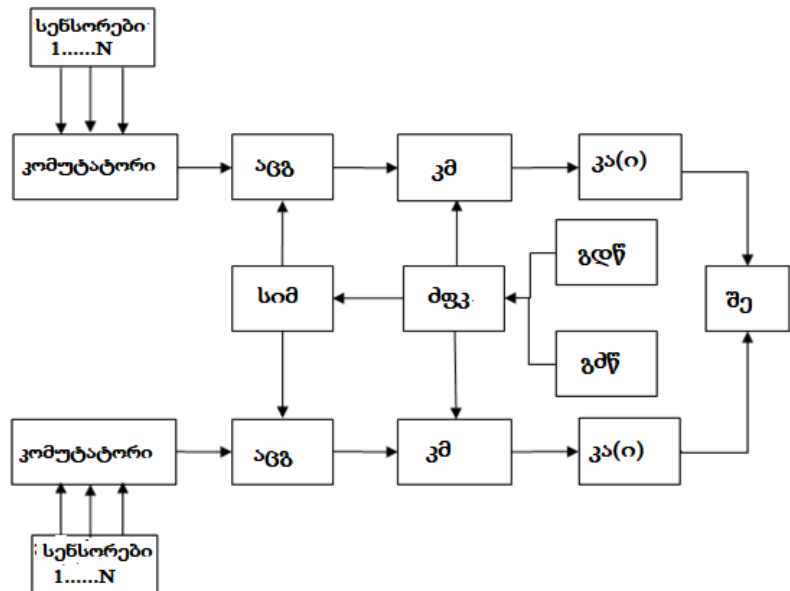
ფუნქციური კავშირის სტრუქტურა შემუშავდა ყოვლისმომცველი მონიტორინგის სისტემისთვის, რომელიც განკუთვნილია დატვირთვის ქვეშ მყოფი ელექტროსადგურების ელექტრომოწყობილობებისა და ელექტროდანადგარების დიაგნოსტიკის, კონტროლისა და მართვისთვის. ეს სისტემა უზრუნველყოფს ეფექტურ მონიტორინგს, დიაგნოსტიკას, კონტროლს და მთლიანობაში ფუნქციონირებას, ინფორმაციის, სტრუქტურული და დროებითი რეზერვის გამოყენების საფუძველზე.

კონტროლირებადი პარამეტრების განაწილებისა და ელექტრომოწყობილობების ეფექტურობის გენერირება ელექტროქვესადგურების მუშაობის რეჟიმების მონიტორინგისა და კონტროლისთვის დადგენილია ნეირონული ქსელის გამოყენებით, რომელიც ფუნქციონირებს როგორც გაზომილი და კონტროლირებადი ნაკადების მოდელი, ასევე მათი რეაქცია ანალიზის ელემენტების მდგომარეობის ცვლილებებზე და გაზომილი და მართვის სისტემები ცნობილი კონტროლირებადი პარამეტრებით, რამაც ციფრული მოდელის შექმნის საშუალება მოგვცა.

შემუშავებული მათემატიკური ჩარჩოს გამოყენებით ნეირონული ქსელის იმპლემენტაციის ანალიზის საფუძველზე, MatLabSimPowerSystems აპლიკაციის

გამოყენებით სიმულირდა დატვირთვის ქვეშ მყოფი ელექტროსადგურების ელექტრომომწობილობებისა და მოწყობილობების დიაგნოსტიკის, მონიტორინგისა და კონტროლის ინტეგრირებული სისტემის მუშაობის რეჟიმები.

ნახ. 2-ზე გამოსახულია საზომი, საინფორმაციო და მართვის მოდულის სტრუქტურა, რომელიც დაყოფილია ორ სექციად, რომლებიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია საერთო აქტივატორის (9) მეშვეობით - აკუმულატორით, რომელსაც ორივე სექციიდან აქვს უკუკავშირი. ელექტრომომწობილობებისა და ელექტროდანადგარების მუშაობის რეჟიმების მონიტორინგთან დაკავშირებული სექცია მოიცავს შემდეგ სენსორებს:



ნახ.2. საზომ საინფორმაციო მმართველი მოდულის სტრუქტურა

საზომ-საინფორმაციო მმართველი მოდულის სტრუქტურა გარდა სენსორებისა მოიცავს კომუნიკატორებს, რომელთა გავლით ჩართულია ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი (აგვ), ელექტრული ენერგიით კვების წყაროები: გენერაციის ძირითადი წყარო (გძწ) და გენერაციის დამატებითი წყარო (გდწ), ძაბვის ფორმირების კვანძი (მფკ), რომელიც გამოიმუშავებს საზომ-საინფორმაციო მმართველი მოდულის მუშაობისათვის საჭირო ძაბვის რიგს და იგი მოდულირებს სინქრონიზმულსებს (სიმ) აგვ-ს გაშვებისათვის. საზომ-საინფორმაციო მმართველი მოდულის შიგა გენერატორი აფორმირებს დენის

იმპულსებს, რომლებიც განსაზღვრავენ სერიული კოდის გამომავალი სიჩქარეს კოდირების მოწყობილობის (კმ) აცგ-ს გამომავალიდან, რომელიც გარდაქმნის ორმაგ სერიულ კოდს აცგ-ს - გამომავალიდან სიგნალად, რომელშიც "0" და "1" წარმოდგენილია სხვადასხვა ხანგრძლივობის იმპულსებით, კავშირის არხი (ინტერფეისი) (კა(ი))-ს მეშვეობითაც გენერირებული მმართველი ზემოქმედებები გადაეცემა შემსრულებელ ელემენტებს (შე) ძალური ქვესადგურების ელექტროდანადგარებისა და ელექტროტექნიკური მოწყობილობების მუშაობის რეჟიმების მართვისათვის, სადაც კონსტრუქციული სქემების ფუნქციონალური კავშირების რაციონალური სტრუქტურა უზრუნველყოფს მათი ფუნქციონირების ეფექტურობისა და საიმედოობის მოთხოვნილ დონეს.

მესამე თავში დატვირთვის ქვეშ მყოფი ძალური ტრანსფორმატორების ელექტრული კომპონენტების მდგომარეობის დიაგნოსტიკური მოწყობილობების ეფექტურობის გასაუმჯობესებლად გრაგნილის იზოლაციის პოლიმერიზაციის ხარისხისა და ზეთის ტემპერატურის ცვლილებებით მიმდინარე პროცესების გათვალისწინებით დასაბუთებულია მათი ეკვივალენტური სქემები. ეს სქემები იძლევა დატვირთვის ქვეშ მყოფი ძალური ტრანსფორმატორის ელექტრული კომპონენტების დაზიანების დაწყების ან არსებობის აღმოჩენის საშუალებას.

წარმოდგენილია ზეთის საშუალო ტემპერატურის გაანგარიშება და მისი გავლენა გრაგნილის აქტიურ წინააღმდეგობაზე.

ძალური ტრანსფორმატორის ელექტრული კომპონენტების ელექტროსტატიკური და ელექტრომაგნიტური პარამეტრები, როგორცაა: აქტიური $R(t)$, ინდუქციური $L(t)$ და ტევადური $C(t)$ კომპონენტები და მათი სრული წინაღობის $Z(t)$, ახასიათებენ მის მდგომარეობას t დროის მომენტისათვის. ამ კომპონენტების დინამიკა საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ ძალური ტრანსფორმატორის ელექტრული კომპონენტების ნორმალური ან ანომალური მდგომარეობა. ამრიგად, ტრანსფორმატორის სრული წინაღობის $Z(t)$ -ს აქტიური კომპონენტის $R(t)$ -ს ზრდის ტენდენცია მიუთითებს მისი გამტარების კონტაქტური შეერთებების დაზინძურებაზე. $R(t)$ -ის შემცირება მიუთითებს ხვიათაშორის მოკლე ჩართვაზე.

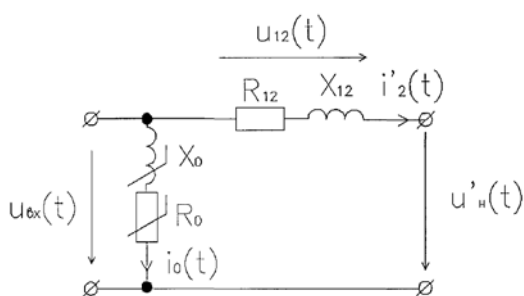
ინდუქციური კომპონენტის $L(t)$ -ის ზრდის ან შემცირების ტენდენცია ახასიათებს მის მაგნიტურ სისტემაში არსებულ დარღვევებს, გრაგნილის დეფორმაციას ან „ფოლადის ცეცხლს“. $C(t)$ -ის გაზრდის/შემცირების ტენდენცია ეფუძნება კალე-კალეს ფორმულას:

$$\frac{1}{C_2} = \frac{1}{\epsilon_0 A} \left[\frac{d_2}{\epsilon_{pb}} + \frac{1}{k_1 \cdot \epsilon_{sp} + (1 - k_1) \cdot \epsilon_{oil}} \right] \quad (5)$$

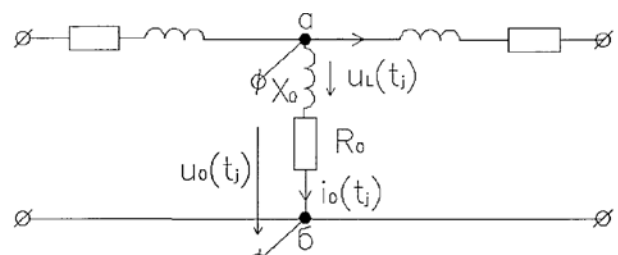
სადაც A -ზედაპირის ფართობია; d_1 - იზოლაციის ძეთის ფენის სისქეა; d_2 - იზოლაციის ქაღალდის ფენის სისქეა; k_1 - საშუალო ფართობის კოეფიციენტი; ϵ_{pb} - იზოლაციის ქაღალდის ფენის დიელექტრიკული შეღწევადობაა; ϵ_{sp} - იზოლაციათაშორისი ფენის დიელექტრიკული შეღწევადობაა; ϵ_{oil} - იზოლაციის ზეთის ფენის დიელექტრიკული შეღწევადობაა. ეს საშუალებას გვაძლევს ვიმსჯელოთ გრაგნილის იზოლაციის მდგომარეობის შესახებ.

$R(t)$, $L(t)$, $C(t)$ -ის გაზომვა დატვირთვის ქვეშ პირდაპირ შეუძლებელია; თუმცა, ეკვივალენტური წრედის ანალიზი საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ დამოკიდებულებები, რომლებიც ამ პარამეტრებს აკავშირებს დატვირთვის ქვეშ მყოფი ძალური ტრანსფორმატორის დენის და ძაბვის გაზომილ მნიშვნელობებთან.

Γ -სებრი (ნახ. 3) და T -სებრი (ნახ. 4) ეკვივალენტური სქემების ანალიზის საფუძველზე ნორმალური მუშაობის დროს, (ნახ.5)-ზე წარმოდგენილია T -სებრი ეკვივალენტური სქემა ჩანაცვლების სქემა არანორმალური მუშაობის დროს და აღწერილია პროცესები, რომლებიც ხდება ძალური ტრანსფორმატორის კომპონენტებში (გრაგნილები, იზოლაცია და ა.შ.) გაუმართაობის დროს და განსაზღვრულია შესაბამისი გამოთვლითი დამოკიდებულებები.



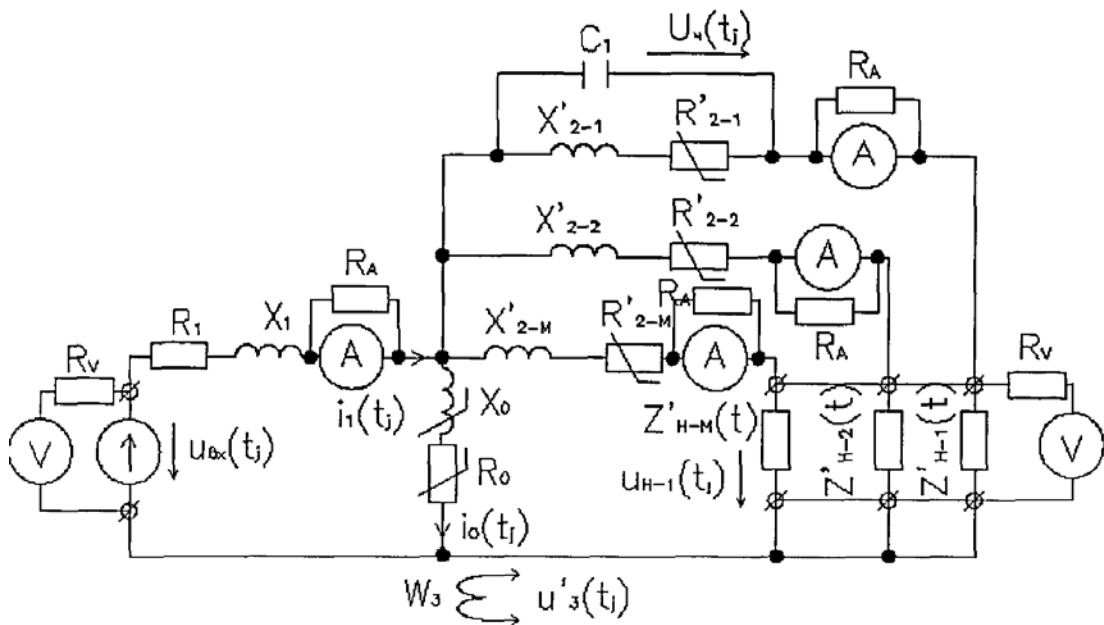
ნახ.3. Γ -სებრი ჩანაცვლების სქემა



ნახ.4 ტრანსფორმატორის ჩანაცვლების T -სებრი სქემა

ნახ.5. -ზე მოცემულ სქემაზე ასახულია შემდეგი ელემენტები:

პირველადი გრაგნილი: R_1 - აქტიური წინაღობა; X_1 - ფანტვის ინდუქციური წინაღობა; დამაგნიტების შტო: R_0 - აქტიური არაწრფივი წინაღობა; X_0 - ფანტვის არაწრფივი ინდუქციური წინაღობა; i -ური გრაგნილი, სადაც $i=1,2,3,\dots,M$: R'_{2-i} - პირველად წრედზე დაყვანილი აქტიური წინაღობა; X'_{2-i} - პირველად წრედზე დაყვანილი ფანტვის ინდუქციური წინაღობა; M - მეორადი გრაგნილების რიცხვი; Z'_{H-i} - i -ური გრაგნილის დატვირთვის წინაღობა, დაყვანილი პირველად წრედზე; R_A და R_V - ამპერმეტრისა და ვოლტმეტრის შიგა წინაღობებია.



ნახ.5. ძალური ტრანსფორმატორის ჩანაცვლების სქემა დაზიანებული გრაგნილით

საიდანაც ელექტროტექნიკის თეორიული საფუძვლების მეთოდების საფუძველზე მივიღებთ:

$$L_{12} = \frac{u_{12}(t_1)}{\frac{di'_2}{dt}(t_1)} \quad (6)$$

$$R_{12} = \frac{u_{12}(t_2)}{i'_2(t_2)} \quad (7)$$

$$C_1 = \frac{i'_{2-1}(t_j)}{\frac{du_{2-1}(t_j) - R'_{2-1} \cdot i'_{2-1}(t_j)}{dt}} \quad (8)$$

წარმოდგენილ ფორმულებში ძაბვები და დენები დაყვანილია ნომინალურ სიხშირესა და პირველად წრედზე, რადგან ეკვივალენტური წრედები ადეკვატურია უფრო მაღალი ჰარმონიკების არარსებობის შემთხვევაში.

მრავალი გარე ფაქტორის (დატვირთვის რყევები, გარემოს ტემპერატურის ცვლილებები) გავლენის გათვალისწინებით, ჩვენ განვიხილავთ გრაგნილის აქტიური წინააღმდეგობის R ცვლილებებს ტრანსფორმატორის ზეთის ტემპერატურის ცვლილებებით:

$$R_{cp} = R_H + R_H a \cdot (T_{cp} - T_H) \quad (9)$$

R_{cp} -გრაგნილის წინააღმდეგობაა საშუალო ტემპერატურის T_{cp} -ს დროს (განისაზღვრება ანგარიშის გზით);

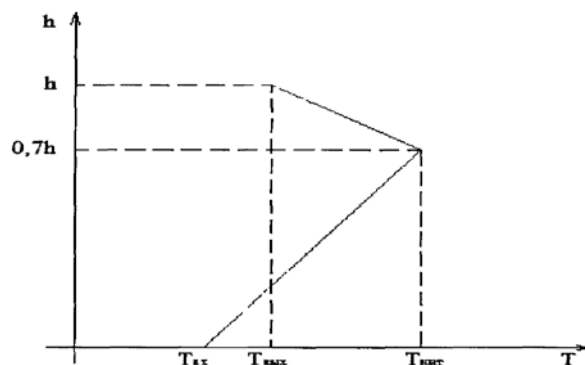
R_H - გამტარის ნომინალური წინააღმდეგობაა T_H ტემპერატურის დროს (განისაზღვრება დანადგარის პასპორტის მიხედვით, ჩვეულებრივ 20°C დროს);

a - მეტალის ტემპერატურული კოეფიციენტი, რისგანაც დამზადებულია სადენი. საცნობარო ცხრილების თანახმად: ალუმინისათვის $a=0,0039$; სპილენძისათვის $a = 0,004$

გამოსავალზე ტრანსფორმატორის ზეთის ტემპერატურის სენსორების არარსებობის შემთხვევაში, T_{cp} -ის გაანგარიშება გრაგნილის წინააღმდეგობის დასაზუსტებლად ხორციელდება IEC-ის შესაბამისად:

თუ შესასვლელთან T_{BX} და გამოსასვლელთან $T_{ВЫХ}$ არის ტრანსფორმატორის ზეთის ტემპერატურის სენსორები, T_{cp} -ის დასადგენად აუცილებელია ზეთის ტემპერატურის მნიშვნელობის ცოდნა გრაგნილის ყველაზე ცხელ წერტილში T_{HHT} (გამოთვლა ეფუძნება IEC -354-91 და გოსტ 14209-85 სტანდარტებს).

მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტების საფუძველზე დადგინდა, რომ გრაგნილის ყველაზე ცხელი წერტილის პოზიცია შეესაბამება $0,7h$ სიმაღლეს (h არის ფაზის გრაგნილის სიმაღლე). გამოვთვალოთ საშუალო ტემპერატურა (ნახ. 6).



ნახ. 6. ზეთის ტემპერატურის დამოკიდებულების გრაფიკი გრაგნილის სიმაღლეზე

ვიპოვოთ T_{cp} შემდეგი განტოლების გამოყენებით:

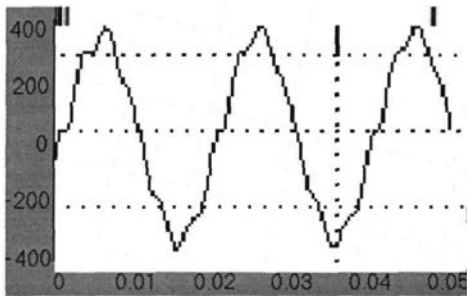
$$T_{cp} = \frac{1}{h} \int_{0,0001h}^h T(x) dX = \frac{1}{h} \left[\int_{0,000h}^{0,7h} T_1(x) dx + \int_{0,07h}^h T_2(x) dx \right] \quad (10)$$

ამოხსნის შედეგად მივიღებთ T_{cp} :

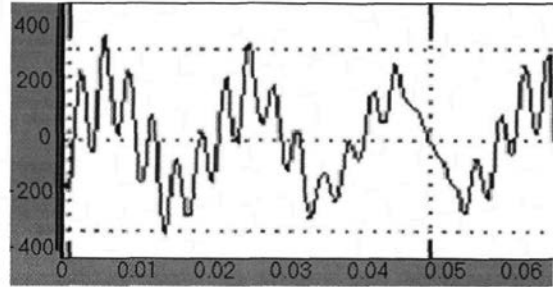
$$T_{cp} = 0,4989T_{HHT} + 0,3509T_{BX} + 0,15T_{BIX} \quad (11)$$

საშუალო ტემპერატურის გამოთვლის ეს მეთოდი მთლიანად გამორიცხავს გრაგნილის მდგომარეობისა და მისი იზოლაციის შესახებ ცრუ პროგნოზებს.

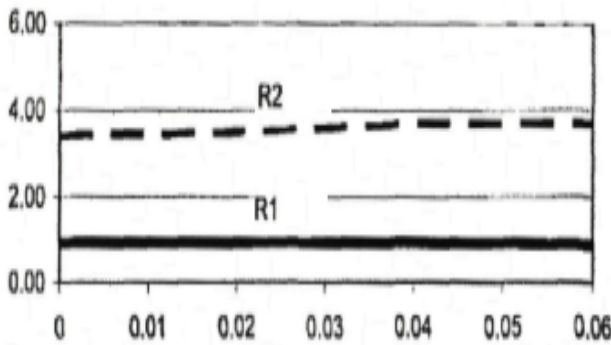
სიმულაცია ჩატარდა Matlab-ის გარემოში სამფაზიანი, ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორისთვის, რომლის სიმძლავრე შეადგენს 1000 კვა-ს და ძაბვა 10/0.4 კვ-ს (სურ. 7-12). ყველა გაზომვა ჩატარდა A ფაზისთვის.



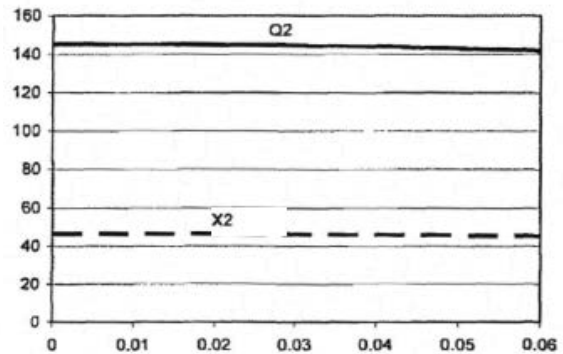
ნახ.7. $U=0.4$ კვ . დახვეწილი მოდელის (ნორმალური მდგომარეობა) ოსცილოგრამა



ნახ.8. $U=0.4$ კვ . დაზუსტებული მოდელის (ავარიული მდგომარეობა) ოსცილოგრამა



ნახ.9. $U=10$ კვ. გრაგნილების წინაღობის გრაფიკი



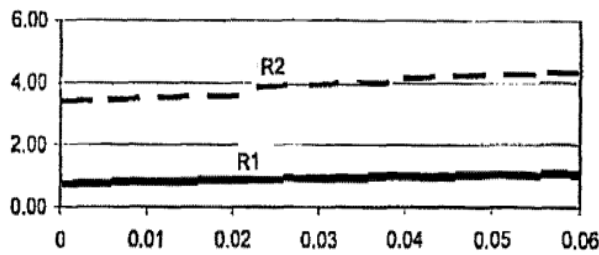
ნახ.10. $U=10$ კვ. ინდუქციური სიმძლავრისა და გრაგნილის წინაღობის გრაფიკი

ნაჩვენები პერიოდის განმავლობაში, ტრანსფორმატორის გრაგნილების საჭირო პარამეტრები იცვლება 5-8%-ის ფარგლებში. ეს მიუთითებს ნორმალურ სამუშაო რეჟიმზე და დეფექტების არარსებობაზე.

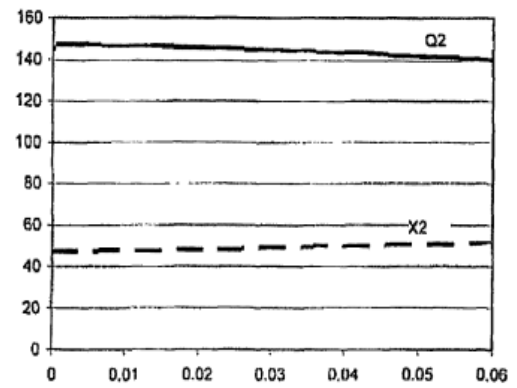
ახლა შევასრულოთ მოდელირება ავარიული რეჟიმისათვის (ნახ.11, ნახ.12)

აქ უკვე ვხედავთ გადახრებს 10-15%-ის ფარგლებში. ეს დესტრუქციული პროცესების გაჩენაზე მიუთითებს.

დიაგნოსტიკის დროს, აქტიური, ინდუქციური და ტევადობითი წინააღმდეგობები შედარებულია ნომინალურ მნიშვნელობებთან და ფაზებს შორის. ეს საშუალებას იძლევა შეფასდეს აღჭურვილობის მდგომარეობა.



ნახ. 11. U=10 კვ. გრაგნილების წინააღმდეგობის გრაფიკი



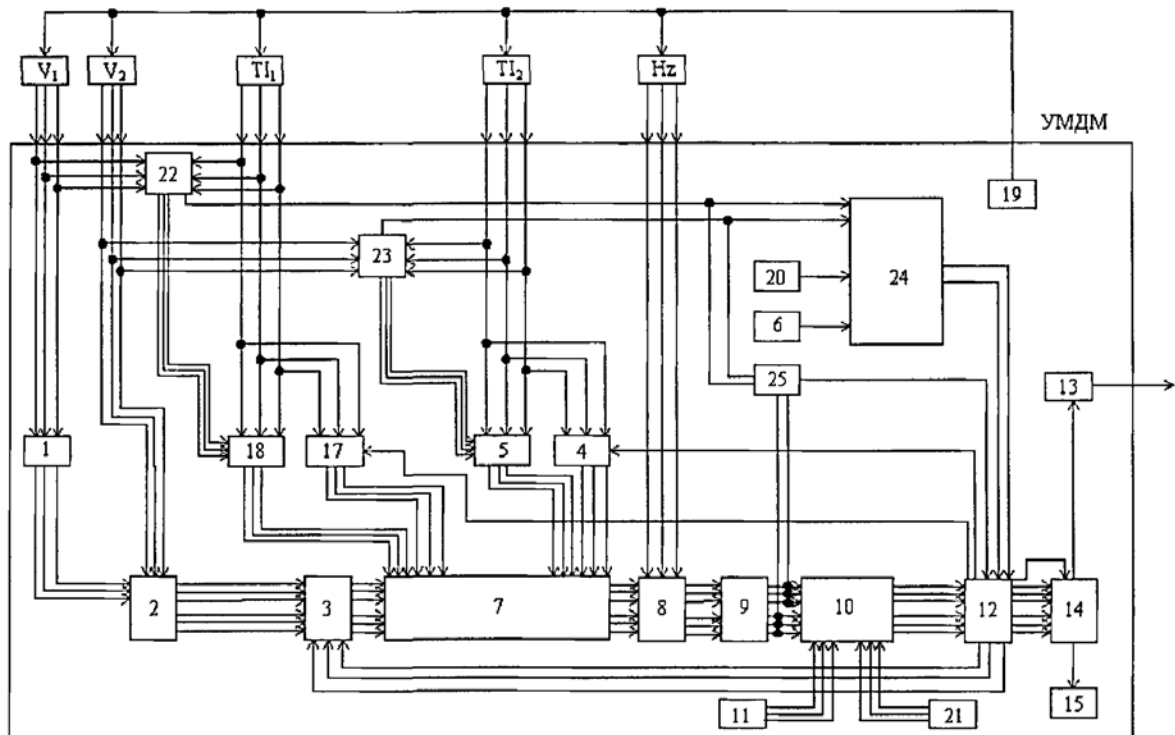
ნახ. 12. U=10 კვ. ინდუქციური სიმძლავრისა და გრაგნილის წინააღმდეგობის გრაფიკი

მეოთხე თავში დამუშავებულია ალგორითმული და ტექნიკური გადაწყვეტილებები დატვირთვის ქვეშ მყოფი ძალური ტრანსფორმატორების ელექტრული კომპონენტების დიაგნოსტიკის ეფექტურობის გასაუმჯობესებლად და დასაბუთებულია სხვადასხვა კონსტრუქციაში განხორციელებული ძალური ტრანსფორმატორების ფუნქციური დიაგნოსტიკური მოწყობილობების რაციონალურ პარამეტრები, რომლებიც საშუალებას იძლევა ტრანსფორმატორის კომპონენტების მდგომარეობას დატვირთვის ქვეშ გავუწიოთ მონიტორინგი და პროგნოზირება მოვახდინოთ, როგორც კონსტრუქციაში ინტეგრაციის გარეშე, ასევე განხორციელების შემდეგ.

დამუშავებული მობილური (გარე) მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის მოწყობილობა ხასიათდება შემდეგი მახასიათებლებით:

თითოეული ფაზისთვის 22, 23 და 24 ბლოკებში დროის ნებისმიერ ინტერვალში ხდება აქტიური წინააღმდეგობის გადახრის გამოთვლა მაღალი და დაბალი ძაბვის მხარეებზე არაწრფივი კომპონენტების (ჰარმონიკების) გათვალისწინებით; თითოეული ფაზისთვის 7, 8, 9 და 10 ერთეულებში ნებისმიერ

დროის ინტერვალში, ხდება ინდუქციურობის გადახრის გამოთვლა მაღალი და დაბალი ძაბვის მხარეებზე არაწრფივი კომპონენტების (ჰარმონიკების) გათვალისწინებით; აქტიური წინააღმდეგობისა და ინდუქციურობის მნიშვნელობების გადახრების შედარება აღჭურვილობის მწარმოებლის მიერ დადგენილ ნომინალურ მნიშვნელობებთან და ფაზებს შორის. ეს საშუალებას იძლევა, გადახრის სიდიდის მონაცემების გამოყენებით, განხორციელდეს ძალური ტრანსფორმატორის დიაგნოსტიკა, მონიტორინგი და დაცვა (ნახ. 13).



ნახ.13. მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის მობილური მოწყობილობის პრინციპული სქემა

ძალური ტრანსფორმატორის დატვირთვის ქვეშ მუშაობის პროცესში იზომება პირველადი U_1 და მეორადი U_2 ძაბვების მყისიერი მნიშვნელობები. მაგალითად, V_1 და V_2 ვოლტმეტრების გამოყენებით. V_1 -დან მიღებული სიგნალი მიეწოდება ბლოკი 1-ის შესასვლელს. ბლოკი 1 ითვლის პირველადი ძაბვის დაყვანილ მნიშვნელობას მეორად მნიშვნელობამდე. ბლოკი 2-ის შესასვლელზე V_2 -დან და ბლოკი 1-ის გამოსასვლელიდან მიეწოდება სიგნალები. ბლოკი 2-ში გამოითვლება მეორად მხარეზე დაყვანილი ძაბვების სხვაობა.

მე-10 ბლოკში, პერიოდისთვის ხდება L_a -ს მნიშვნელობა შედარება L_r პარამეტრის დანაყენებ მნიშვნელობასთან 21 და 11 ბლოკებიდან შესაბამისად მაღალი ძაბვის და დაბალი ძაბვის გრაგნილებისათვის და გამოითვლება მათი სხვაობა:

$$\Delta L = \frac{L_a - L_r}{L_r} \cdot 100 \% \quad (12)$$

სადაც L_a - არის ინდუქციურობის საშუალო მნიშვნელობა პერიოდის განმავლობაში; L_r -ძალური ტრანსფორმატორის ინდუქციურობის დანაყენების მნიშვნელობა მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილებისათვის, განსაზღვრული ექსპერიმენტულად ქარხანა-დამამზადებლის მიერ.

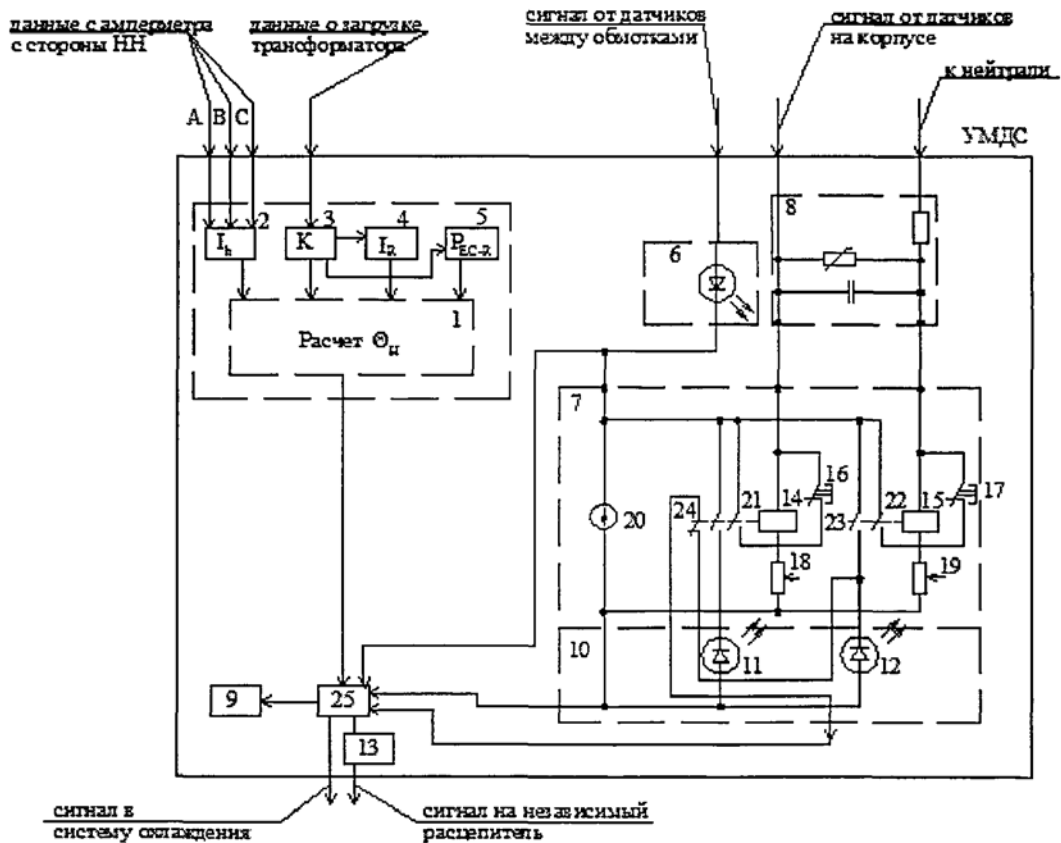
24-ე ბლოკში, პერიოდის R_a მნიშვნელობა შედარდება მე-6 და მე-20 ბლოკებიდან მაღალი ძაბვის და დაბალი ძაბვის გრაგნილების R_r პარამეტრის მნიშვნელობასთან, შესაბამისად, და გამოითვლება მათი სხვაობა:

$$\Delta R = \frac{R_a - R_r}{R_r} \cdot 100 \% \quad (13)$$

სადაც R_a -არის აქტიური წინაღობის საშუალო მნიშვნელობა გაზომილი პერიოდის განმავლობაში 22 და 23 ბლოკებიდან; R_r - ტრანსფორმატორის აქტიური წინაღობის დაყენების მნიშვნელობა. იგი განისაზღვრება ქარხანა-დამამზადებლის მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტით.

ნახ.14-ზე მოცემულია სტაციონარულ მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის მოწყობილობა. ის წინასწარ მონტაჟდება ქსელიდან გამორთულ ტრანსფორმატორზე.

ეს მოწყობილობა შემდეგ იძლევა ტრანსფორმატორის პარამეტრების მონიტორინგის საშუალებას ტრანსფორმატორის მუშაობის 20-წლიანი მომსახურების ვადის განმავლობაში. ამ მოწყობილობის გამორჩეული თვისებაა იზოლაციის წინააღმდეგობის, იზოლაციის ტენიანობის ხარისხის მონიტორინგისთვის სენსორების არსებობა. ეს სენსორები დამზადებულია გამტარი ნანოსტრუქტურირებული ფოლგისგან დამზადებული ელექტროდებისგან, რომლებიც განლაგებულია ყველა ფაზის იზოლაციის ფენებს შორის და ყველა ძაბვისთვის. ასევე არსებობს ბლოკი, რომელიც ითვლის და აკონტროლებს გრაგნილის იზოლაციის ყველაზე ცხელი წერტილების ტემპერატურას.



ნახ.14. მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის სტაციონარული მოწყობილობის პრინციპული სქემა

თითოეული ელექტროდი სიგნალს უგზავნის საპასუხო ელემენტს 6. ის გათვლილია ყველა სენსორისთვის და აგზავნის სიგნალს ეკრანზე თითოეული სენსორის ჩვენებების შესახებ. ბლოკი 8 შეიცავს რეზისტორს, გადაძაბვის შემზღვეველს ან

განმმუხტველს, და კონდენსატორს. ეს აუცილებელია ბლოკი 7-ის მეორე შესასვლელზე ძაბვის შესაზღუდად, ნეიტრალის პოტენციალის მიწასთან მიმართ გადახრის შემთხვევაში, რაც გამოწვეულია მოკლე ჩართვით. ელექტროდების მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის სტაციონარულ მოწყობილობისთან დაკავშირება ხდება კაბელის საშუალებით. როდესაც ზეთში ტენიანობა ხვდება, გრაფილების იზოლაცია ნესტიანი ხდება. იზოლაციის წინალობა მკვეთრად ეცემა. კორპუსის, იზოლაციის, სენსორის, ბლოკი 6-ის, რელე 14-ის გავლით გამავალი დენი იზრდება. რელე 12 ამუშავდება კონტაქტ 21-ის გავლით თავშეკავებული იქნება. შუქდიოდი 11 აინთება, რაც მიუთითებს იზოლაციის დატენიანებაზე.

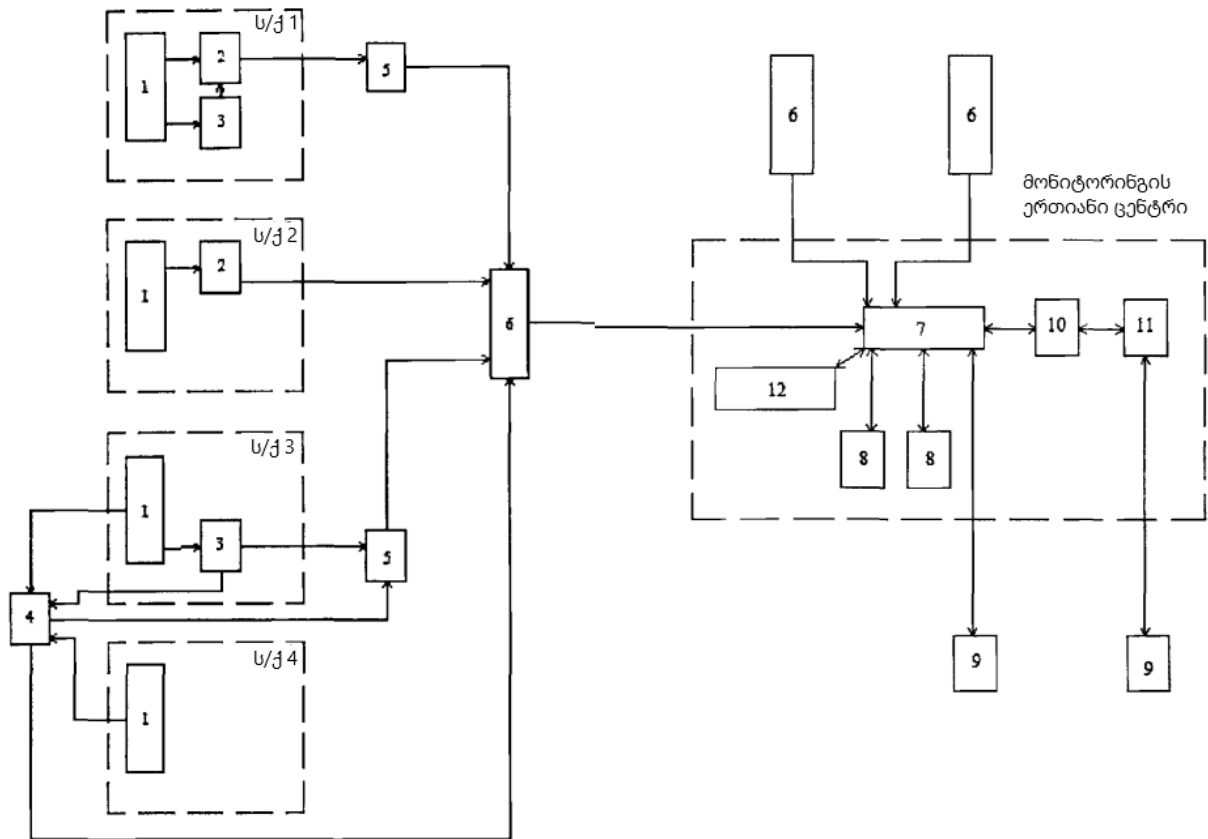
დატენიანების ადგილმდებარეობა განისაზღვრება ბლოკ 6-ში ერთ-ერთი შუქდიოდის განათებით.

მიწასთან მოკლედ შერთვის დროს იზოლაციის წინაღობა სწრაფად ეცემა მიწასთან დენის მოკლედ შერთვის გამო. ერთდროულად ამუშავდება რელეები 14 და 15 და აინთება 11 და 12 შუქდიოდური ნათურები ანათებენ, რაც მიუთითებს მოკლე ჩართვაზე. დაზიანებული ელემენტი იდენტიფიცირდება ბლოკი 6-ით.

ამ ბლოკიდან გამომავალი სიგნალები იგზავნება ტრანსფორმატორის გაგრილების მართვის სისტემაში და ტრანსფორმატორის გამორთვის სისტემაში. ელექტროდები **მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის სტაციონარულ მოწყობილობისთან** დაკავშირებულია საავიაციო კლასის მავთულის გამოყენებით, რომელიც მდგრადია ვიბრაციის, დარტყმის და წრფივი დატვირთვების, აკუსტიკური ხმაურისა და აგრესიული გარემოს მიმართ. მას აქვს ელექტრული ეკრანი, რომელიც იცავს მავთულს ელექტრომაგნიტური ველებისგან. ის ასევე შეიცავს ბლოკს, რომელიც იცავს თავად მოწყობილობას ზედმეტად მაღალი ძაბვისგან გრაგნილებში მოკლე ჩართვის შემთხვევაში ან როდესაც ძაბვა მიაღწევს ელექტროდებს.

ყველაზე უფრო ცხელი წერტილის ტემპერატურის საზომი ელემენტი 1 შედგება ბლოკებისგან 2, 3, 4 და 5. დაბალი ძაბვის მხარეს დამონტაჟებული ამპერმეტრი აწვდის დენის მონაცემებს სამივე ფაზიდან. ბლოკი 3 განსაზღვრავს ტრანსფორმატორის დატვირთვის კოეფიციენტს ან იღებს მონაცემებს მის შესახებ. ბლოკებიდან 4 და 5 აიღება მონაცემები ნომინალური დენებისა და ნომინალური გრიგალური დენების დანაკარგების შესახებ ყველაზე უფრო ცხელ წერტილში. ბლოკი 1 ითვლის ყველაზე უფრო ცხელი წერტილის ტემპერატურას. ეს გამოთვლა ხორციელდება დაბალი ძაბვის გრაგნილისთვის, რადგან იქ ტემპერატურა მნიშვნელოვნად მაღალია გაგრილების ცუდი პირობების გამო. ტემპერატურული მონაცემები იგზავნება ბლოკ 25-ში, 9 დისპლეიზე. ბლოკი 25 აანალიზებს ცხელი წერტილის ტემპერატურის მონაცემებს და აგზავნის შესაბამის სიგნალს გაგრილების სისტემაში მისი მუშაობის რეგულირებისთვის. ეს საშუალებას მისცემს გაგრილების სისტემის უფრო ეფექტურად გამოყენებას, გაახანგრძლივებს მის მომსახურების ვადას და შეამცირებს ენერჯის მოხმარებას.

ნახ.15-ზე ნაჩვენებია ტრანსფორმატორის კომპლექსური კონტროლის სისტემა.



ნახ.15. ძალური ტრანსფორმატორის კომპლექსური დიაგნოსტიკის სისტემის სტრუქტურული სქემა

სატრანსფორმატორო ქვესადგური #1-ში, არსებული მართვის მოწყობილობის გარდა, მონტაჟდება მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის სტაციონარული მოწყობილობა. ეს მოწყობილობა იღებს ინფორმაციას ყველა კონტროლირებადი პარამეტრის შესახებ და გადასცემს მას ოპერატიული პერსონალის მართვის პანელს.

სატრანსფორმატორო ქვესადგური # 2 -ში დამონტაჟებულია მხოლოდ მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის სტაციონარული მოწყობილობა. როგორც წესი, ეს ეხება მცირე სატრანსფორმატორო ქვესადგურებს, რომლებიც ამარაგებენ არასაპასუხისმგებლო მომხმარებლებს. მათ ასევე არ ჰყავთ მუდმივი მორიგე პერსონალი. ამიტომ, მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის სტაციონარული მოწყობილობიდან ყველა ინფორმაცია გადაეცემა დისტანციურ ტერმინალს

(სერვერს), რომელიც აგროვებს ინფორმაციას სატრანსფორმატორო ქვესადგურებიდან ტერიტორიული პრინციპის შესაბამისად.

სატრანსფორმატორო ქვესადგურში #3 -ში დამონტაჟებულია არსებული მართვის მოწყობილობა. ს/ქ #4 - ში დამატებითი დიაგნოსტიკური მოწყობილობა არ არის. მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის მობილური მოწყობილობიდან იღებს ინფორმაციას ყველა მონიტორინგის პარამეტრის შესახებ და გადასცემს მას ოპერატორის პერსონალის მართვის პანელს ან, თუ ის არ არის, მაშინ დისტანციურ ტერმინალს.

მეხუთე თავში წარმოდგენილია რიცხვითი და ექსპერიმენტული კვლევების შედეგები და დასაბუთებულია დატვირთვის ქვეშ მყოფი ძალური ტრანსფორმატორის კომპონენტების ფუნქციური დიაგნოსტიკის მოწყობილობების რაციონალური პარამეტრები. შემუშავებულია ფუნქციური დიაგნოსტიკისა და ელექტრული კომპონენტების მდგომარეობის პროგნოზირების პრაქტიკული მიდგომა. შემუშავებული მოწყობილობების სათანადო ფუნქციონირების უზრუნველსაყოფად, ჩვენ განვსაზღვრეთ და დავასაბუთეთ მათი რაციონალური პარამეტრები.

ძალური ტრანსფორმატორის ტექნიკური მდგომარეობის პროგნოზირება და მისი ნარჩენი სიცოცხლის განსაზღვრა ეფუძნება მიახლოებითი ფუნქციის გამოყენებას, რომელიც ასახავს მისი დიაგნოსტიკური პარამეტრის დროში ცვლილებას, რომელიც ახასიათებს ტრანსფორმატორის მდგომარეობას.

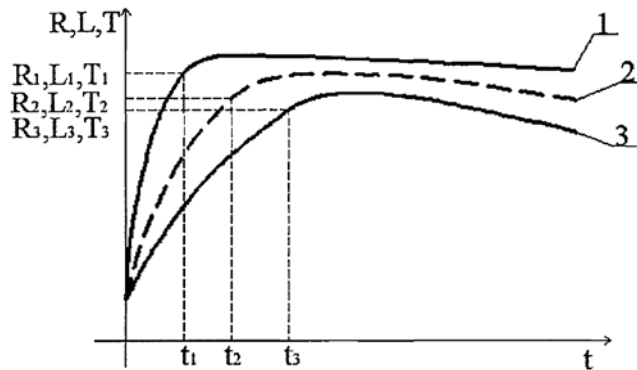
ძალური ტრანსფორმატორის ელექტრული ელემენტების კონტროლირებადი პარამეტრების ცვლილების პროგნოზირებისთვის დატვირთვის ქვეშ, ნაშრომში გამოყენებულია სრული წინაღობის აქტიური $R(t)$, ინდუქციური $L(t)$, ტევადობის $C(t)$ მდგენელების დინამიკის მიახლოებითი ფუნქცია, გამოყენებულია ხარისხობრივი პოლინომი:

$$\Delta Z_j(t) = B_{cj}t^{\beta_j} + \Delta Z_{\beta_j} + \Delta \Pi_{Z_j} \quad (14)$$

სადაც $\Delta Z_j(t)$ - ფუნქციონალური პარამეტრის ცვლილებაა; B_{cj} - J -ური ფუნქციონალური პარამეტრის ცვლილების სიჩქარეა; β - ხარისხის მაჩვენებელია; ΔZ_{β_j} - არის პარამეტრის ფაქტიური ცვლილებისა და თეორიული რეალიზაციის შემთხვევითი გადახრა ნორმალური განაწილების კანონით (გაუსის განაწილებით)

გამოწვეული გარეშე გავლენის გამო; $\Delta\Pi_{Zj}$ - არის პარამეტრის მნიშვნელობა, რომელიც მოიძებნება ნომინალურ რეჟიმზე გასვლის პროცესით.

ნახ.16-ზე მოცემულია Z საპროგნოზო პარამეტრის განსაზღვრის სქემა.



ნახ.16. საპროგნოზო პარამეტრის განსაზღვრის სქემა: 1-აბსოლუტურად გამართული ელემენტი; 2- დასაშვებ დიაპაზონში მყოფი ელემენტი; 3- ზღვრულად გაცვეთილი ელემენტი

მივიღებთ:

$$Z = \left(\frac{R_i - R_H}{t_1}\right) X\left(\frac{t_2}{R_3 - R_H}\right); Z = \left(\frac{L_i - L_H}{t_1}\right) X\left(\frac{t_2}{L_3 - L_H}\right); Z = \left(\frac{T_i - T_H}{t_1}\right) X\left(\frac{t_2}{T_3 - T_H}\right) \quad (15)$$

სადაც R_H, L_H, T_H - საწყისი მნიშვნელობებია დიაგნოსტიკის დროს;

- $R_i, L_i, T_i, R_3, L_3, T_3$ - შესაბამისად მნიშვნელობებია სადიაგნოსტიკო და ზღვრულად გაცვეთილ ობიექტებში; t_1 - დროის მომენტი დიაგნოსტიკის დროს; t_2 - ობიექტის ნორმალურ მდგომარეობაში ყოფნის დროის მომენტი.

ტრანსფორმატორი ქარხანაში დამზადების, მის კონსტრუქციაში ჩაშენებულია სენსორები და ექსპლუატაციის დროს ხორციელდება პირდაპირი გაზომვები იმავე საშუალებების გამოყენებით, რომლებსაც ჩანაცვლების სქემები უზრუნველყოფენ.

ქარხანაში ტრანსფორმატორში სენსორის ჩაშენების შემთხვევაში ხდება ძალური ტრანსფორმატორის ელექტრული ელემენტების მდგომარეობის პროგნოზირება იგივე მეთოდებით, როგორც ჩანაცვლების სქემებში.

თუ სენსორები თავდაპირველად არ იყო ჩაშენებული, მაშინ ძალური ტრანსფორმატორის ელექტრული ელემენტების მდგომარეობის პროგნოზირება დატვირთვის ქვეშ მდგომარეობს მათი სრული წინააღმდეგობის აქტიური,

ინდუქციური და ტევადობის კომპონენტების დინამიკის მიახლოებით გამოთვლის ექსტრაპოლაციის

ხარისხობრივი პოლინომების მეშვეობით, რომელთა მნიშვნელობები მიიღება გაზომვების ირიბი მეთოდებით.

პროგნოზირებისთვის მიიღება აქტიური და ინდუქციური წინააღმდეგობების შემდეგი გადახრის ზღვრები:

- 7%-ის ფარგლებში ნორმალურია;
- 10-15%-ის ფარგლებში მიუთითებს დესტრუქციული პროცესების დაწყებაზე, მაგრამ არ საჭიროებს ქსელიდან გათიშვას და შეკეთებას;
- 16-20%-ის ფარგლებში მიუთითებს საფრთხის შესახებ, ოპერატორს ეგზავნება სიგნალი. აუცილებელია ზომების მიღება ტრანსფორმატორის შესაკეთებლად ამოსაღებად, მნიშვნელოვანი მომხმარებლების ქსელიდან გათიშვის გარეშე;
- 25%-დან და მეტიდან - ტრანსფორმატორის ქსელიდან ავარიული გათიშვა.

მომსახურების ან გაუმართაობის კრიტერიუმებია შემდეგი თანაფარდობები:

$$Z > 1 - \text{გამართულია}; Z \leq 1 - \text{გაუმართავია.}$$

ფუნქციური დიაგნოსტიკური მოწყობილობების თავსებადობის შესაფასებლად ძალური ტრანსფორმატორის ელექტრულ კომპონენტებთან გაზომვის წერტილებში დატვირთვის ქვეშ, განიხილება $k_{შზად}$ -ის (მზადყოფნის კოეფიციენტის) მნიშვნელობა, რომელიც განისაზღვრება ფორმულით:

$$K_{შზად} = \frac{P_2(t) - P_3(t)}{P_1(t) - P_3(t)} \cdot \left(1 - \frac{T_{PHC}}{T_{PHH}}\right) \leq 1 \quad (16)$$

სადაც $P_1(t), P_3(t), P_2(t)$ არის ელექტროტექნიკური ელემენტის რესურსის ალბათობებია, რომლებიც შესაბამისად იმყოფებიან, სრულიად გამართულ ან ოდნავ გაცვეთილ მდგომარეობაში დასაშვებ დიაპაზონში, (6), (7), (8), დამოკიდებულებების გათვალისწინებით, რომლებიც აკავშირებენ პროგნოზულ პარამეტრების $R(t), L(t), C(t)$ მნიშვნელობებს $u(t), i(t)$ მნიშვნელობებთან გაზომვის წერტილებში. ამ შემთხვევაში, პროგნოზული პარამეტრების გაზომვების ირიბულობა გავლენას არ ახდენს პარამეტრ m -ის (მათემატიკური მოლოდინი)

მნიშვნელობაზე, ნორმალური განაწილების კანონზე, მაგრამ ზრდის დისპერსიის პარამეტრის σ -ს მნიშვნელობას 10-15%-ის ფარგლებში;

- T_{PHC} - არსებული ტექნიკური დონის ნორმალური მუშაობის დრო;

- T_{PHH} ახალი ტექნიკური დონის ნორმალური მუშაობის დრო;

ნარჩენი რესურსი სიმძლავრის ტრანსფორმატორის რესურსის p^* ამოწურვის სტანდარტიზებული ალბათობით შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$T_{ნარჩ} = \left[\frac{Z'(t_k) - (Z_q^* + \delta_z)}{B_z} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (17)$$

სადაც $Z'(t_k)$ - Z პარამეტრის მნიშვნელობაა კონტროლის t_k მომენტში; Z_q^* - დიაგნოსტიკური პარამეტრის დასაშვები მნიშვნელობაა; δ_z - არის გადახრის სანდოობა, რომელიც განისაზღვრება განაწილების დისპერსიის Dz პარამეტრით და ასევე ნორმირებული ალბათობით ρ^* (0,85-0,995).

— B_0 არის კოეფიციენტი, რომელიც აჩვენებს პარამეტრის ცვლილების სიჩქარეს;

- β -არის მიახლოებითი პოლინომის ხარისხი.

შემდეგ წარმოდგენილია სიმულაციებისა და ექსპერიმენტების შედეგები კვლევის შედეგების დასადასტურებლად. ჩვენს მიერ მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის მობილური მოწყობილობის გამოყენებით დიაგნოსტიკური გამოკვლევები ჩატარდა 6 ტრანსფორმატორისთვის. რომელთაც 25 წელზე მეტი ხნის ექსპლუატაციის ვადა ჰქონდა. 250 კვა - 2 ც.; 400 კვა - 2 ც.; 630 კვა - 2 ც. ექსპერიმენტების მონაცემები აღებულია ღია ოფიციალური წყაროებიდან.

მოწყობილობების ჩვენებების საფუძველზე გაკეთდა შემდეგი დასკვნები:

საჭიროა ახლით ჩანაცვლება კაპიტალური რემონტი - 1 ერთეული (17%) - #. 11, $k_{td} \approx 0.59$, $T_{PH} \approx 12$ თვე; საჭიროა ცალკეული კვანძებისა და აგრეგატების შეკეთება ან შეცვლა 1 ცალი (17%) - #. 12. $k_{td} \Delta 0.74$, $T_{PH} \approx 63$ თვე; საჭიროა რეგულარული მონიტორინგის დაყენება, ახალი კონტროლირებადი პარამეტრების დამატების ჩათვლით, - 1 ცალი (17%) - 10, $k_{td} \approx 0.85$, $T_{PH} \approx 174$ თვე; ნორმალური მდგომარეობა - 3 ცალი (50%) - # 1, 2, 5. $k_{td} \approx 92$, $T_{PH} \approx 211$ თვე.

ძალური ტრანსფორმატორების მდგომარეობის შესახებ მიღებული დასკვნების სანდოობის დასადგენად და შემუშავებული მოწყობილობების სისწორის დამატებითი დადასტურების მიზნით, ტესტები ჩატარდა მოქმედი

სტანდარტების, მათ შორის სახელმძღვანელო დოკუმენტების (სდ) შესაბამისად. ასეთი ექსპერიმენტები ჩატარდა 2 ტრანსფორმატორზე, რომლებიც ყველაზე მეტად დაზიანებულებად იქნა მიჩნეული.

ცდომილება უმეტეს შემთხვევაში 5%-ზე ნაკლები იყო და, მიუხედავად იმისა, რომ ზოგიერთ შემთხვევაში ის 5%-დან 9%-მდე დიაპაზონში იყო, რაც შეესაბამება მათემატიკური მოდელის სიზუსტეს, შეიძლება დავასკვნათ, რომ ახლად შემუშავებული ჩანაცვლების სქემა და დიაგნოსტიკური და მონიტორინგის მოწყობილობები მაღალი საიმედოობით გამოირჩევა. ცდომილების სიდიდე საშუალებას გვაძლევს დარწმუნებით ვთქვათ, რომ ახლად შემუშავებულ გამოთვლის მეთოდს მაღალი სიზუსტე აქვს არსებულ ანალოგებთან შედარებით.

დასკვნა

დისერტაცია წარმოადგენს დასრულებულ სამეცნიერო და საკვალიფიკაციო ნაშრომს, რომელშიც განხილულია რაციონალური პარამეტრების დასაბუთების ამოცანა,

ფუნქციონალური დიაგნოსტიკის ელექტრომოწყობილობების თავსებადობის დამოკიდებულებების დადგენა ძალური ტრანსფორმატორის ელექტროტექნიკურ ელემენტებთან საჭირო დონის უზრუნველსაყოფად, ზეთის ტემპერატურის ცვლილების ფაქტორების, გარდამავალი ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური პროცესების, დენის და ძაბვის ჰარმონიული კომპონენტების, აქტიური, ინდუქციური და ტევადობითი წინააღმდეგობის გათვალისწინებით, დატვირთვის ქვეშ მყოფი ძალური ტრანსფორმატორების ექსპრეს დიაგნოსტიკის ეფექტურობის გასაუმჯობესებლად.

1. დამუშავებულია ძალური ტრანსფორმატორების ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების ნარჩენი რესურსის ფორმირების პროგნოზირების მეთოდიკა დატვირთვის ქვეშ ძალური ტრანსფორმატორების ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების მდგომარეობის ტექნიკური დიაგნოსტიკის საფუძველზე გეგმიურ-გამაფრთხილებელი რემონტის უზრუნველყოფისა და მათი მუშაობის რეჟიმების ეფექტური მართვის მიზნით.

2. დადგენილია, რომ ძალური ქვესადგურის ელექტროდანადგარებისა და ელექტროტექნიკური მოწყობილობების ფუნქციონირების ეფექტურობის ამაღლება უზრუნველყოფილი უნდა იქნეს როგორც ტექნიკური მდგომარეობის დიაგნოსტიკისა და ნარჩენი რესურსის ფორმირების პროგნოზირების მეთოდების, ასევე მათი მუშაობის მართვის მოწყობილობების კომპლექსური გამოყენებით.

3. დიაგნოსტიკაზე დაყრდნობით, დროული დაგეგმილი პროფილაქტიკური ტექნიკური მომსახურების უზრუნველსაყოფად, შემუშავებულია მეთოლოგია დატვირთვის ქვეშ მყოფი ელექტროსადგურების ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების ნარჩენი რესურსის ფორმირების პროგნოზირებისა და მათი მუშაობის რეჟიმების ეფექტური მართვისთვის. საიმედოობის ინდიკატორების დონის გამოსათვლელად, დატვირთვის ქვეშ მყოფი ელექტროსადგურების ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების დიაგნოსტიკის, მართვისა და კონტროლის კომპლექსური სისტემის დამოკიდებულებები განსაზღვრულია მათი ტექნიკური დონის კოეფიციენტთან ფუნქციონალური კავშირის საფუძველზე. ეს კოეფიციენტი ასევე ითვალისწინებს სისტემებისა და ქსელების ფუნქციონირების ეფექტურობას.

4. დადგენილია დეფექტის დაწყების ან განვითარების დროს დატვირთვის ქვეშ მყოფი ძალური ტრანსფორმატორის ელექტროტექნიკური ელემენტების ელექტრომაგნიტური პარამეტრების ცვლილების კანონზომიერებანი, ზეთის ტემპერატურის ცვლილებების, გარდამავალი ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური პროცესების, დენის და ძაბვის ჰარმონიული კომპონენტების გავლენის გათვალისწინებით;

5. შემუშავებულია დატვირთვის ქვეშ მყოფი დენის ტრანსფორმატორების ელექტრული ელემენტების ექსპრეს დიაგნოსტიკის მეთოდი, რომელიც დაფუძნებულია აქტიური, ინდუქციური ტევადობის წინააღმდეგობის დინამიკაზე, დენის და ძაბვის მყისიერი მნიშვნელობების გაზომვით.

6. დამუშავებულია დატვირთვის ქვეშ ძალური ტრანსფორმატორის ელექტროტექნიკური ელემენტების მდგომარეობის პროგნოზირების მეთოდიკა მათი სრული წინააღმდეგობის აქტიური, ინდუქციური და ტევადობის კომპონენტების დინამიკის მიახლოებითი გამოთვლით ექსტრაპოლაციის ხარისხობრივი პოლინომების გამოყენებით, რაც ხდის დეფექტების წარმოშობისა და განვითარების იდენტიფიცირების შესაძლებლობას;

7. წარმოდგენილი ექსპერიმენტული კვლევების შედეგები ადასტურებს მიღებული მოდელებისა და დამოკიდებულებების ადეკვატურობას 9.5% ცდომილების ფარგლებში.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ნაშრომების სია:

1. მუსელიანი თ., გიორგაძე კ., მუსელიანი გ. ელექტროსადგურების ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების ნარჩენი რესურსის პროგნოზირების მეთოდოლოგია. „ენერჯია“, 2026, N1(114), გვ. 5-9;
2. მუსელიანი თ., გიორგაძე კ., მუსელიანი გ. დატვირთვის ქვეშ მომუშავე ქვესადგურების ელექტრომოწყობილობების დენგამტარი ნაწილების დამველების პროცესების მოდელირება. სტუ-ის შრომები, 2026, N1(539), გვ. 97-103. (Scopus Code 2100);
3. გიორგაძე კ. ნაწილობრივი განმუხტვით ელექტროტექნიკური მოწყობილობების ტექნიკური მდგომარეობის დიაგნოსტიკის მეთოდების ანალიზი. „ენერჯია“, 2024, N3(111), გვ.41-45;
4. Giorgadze K. Analysis of Methods of diagnosis and control of the Electrical Equipment and Electrical Installations of power. Proceedings of the Georgian Technical University Student Conference – “IV Innovative Technologies in Engineering”. Tbilisi, 2024, pp. 156-162.

Abstract

In the modern power industry, the increase in the volume of wear and tear of electrical equipment and the lack of the ability to restore it increases the risk, puts not only electrical equipment, but also automatic control, relay protection and emergency management systems in the zone of technological failures and accidents. The economic necessity of solving the problems arising from electrical equipment has led to the development and implementation of scientific and technical programs, in which the operation, repair, maintenance and modernization of worn-out electrical equipment and electrical devices are allocated as a priority direction for the development of the power complex.

The high wear and tear of electrical equipment and electrical devices operating in power plants requires solving the issue of their diagnostics under load in order to improve the efficiency of operation, as well as extend their service life and ensure trouble-free and effective operation of power plants by creating the necessary operating modes.

The need for accurate knowledge of the current state of electrical installations and electrotechnical devices of power substations under load and the need to predict their technical condition is due to economic realities associated with the urgent need to extend the service life of existing equipment, the lack of financial resources required to replace electrical installations and electrotechnical devices, and the need to economically spend funds on repairs.

Therefore, the study of changes in oil temperature, transient electromagnetic and electromechanical processes, harmonic components of current and voltage, active, inductive and capacitive resistances and the regularities that affect the electrical elements of power substations under load is an urgent scientific task.

The first chapter of the work presents the results of a literature review. In particular, methods for diagnosing and controlling electrical installations and electrotechnical devices of power substations, analysis of structural schemes of electrical systems for diagnosing the condition of electrical installations and electrical devices of power substations under load, and physical processes occurring in power transformers and their impact on the control and prediction of the technical condition of transformers.

Based on the conducted literature analysis, the relevance of this dissertation work was determined. In particular, the study of changes in oil temperature, transient electromagnetic and electromechanical processes, harmonic components of current and voltage, active, inductive and capacitive resistance, and changes in the regularities that affect the electrical elements of power substations under load.

The second chapter of the work presents the structure of functional connections of electrotechnical devices and the determination of the level of reliability indicators of the operation of a complex system for diagnostics, monitoring and control of operating modes of power substations under load, modeling of aging processes occurring in the current-carrying parts of electrical equipment and electrotechnical devices of power substations under load, issues of modeling an object with distributed parameters to determine the formation of a temperature environment during the operation of electrical equipment of power plants, methods for calculating the parameters of generation system elements, issues of working out the structure of functional connections of a complex system for

diagnostics, control and management of electrical equipment and electrical devices of power substations under load.

Energy consumption by insulation is caused by various reasons. Damping of insulation and other defects lead to an increase in dielectric losses and the active component of $\text{tg}\delta$ current. Since at this time the active component of the current increases significantly faster than the capacitive component, the indicator $\text{tg}\delta$ reflects the change in state and losses in it. With a small volume of insulation, the development of local and concentrated defects is observed. Therefore, the measurement of $\text{tg}\delta$ in transformers should be accompanied by the determination of other insulation characteristics (insulation resistance, absorption coefficient, etc.).

The value of $\text{tg}\delta$ increases sharply with increasing insulation temperature. According to the created concept, the aging of current-carrying parts of electrical installations and electrotechnical devices is thermal and is mainly reduced to the breakdown of their insulation.

The third chapter of the work is devoted to the determination and calculation of the parameters of the replacement schemes for diagnosing and predicting the state of the power transformer, the construction of the replacement scheme of the power transformer in the operating mode, the determination of the parameters of the replacement scheme, the calculation of the parameters of the magnetizing branch of the power transformer, the construction of the total replacement scheme of a multi-winding power transformer in the normal state, the multi-winding power transformer.