

UDC 621.316.99

SCOPUS CODE 2100

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-1-97-103>

## დატვირთვის ქვეშ მომუშავე ქვესადგურების ელექტრომოწყობილობების დენგამტარი ნაწილების დამველების პროცესების მოდელირება

- თენგიზ მუსელიანი** საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერჯეტიკის ფაკულტეტის პროფესორი. საქართველო  
E-mail: museliani@yahoo.com
- კახა გიორგაძე** საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერჯეტიკის ფაკულტეტის დოქტორანტი. საქართველო  
E-mail: kaxagiorgaze@gmail.com
- გრიგოლ მუსელიანი** საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერჯეტიკის ფაკულტეტის პროფესორი. ენერჯეტიკისა და ელექტროინჟინერიის აკადემიური დოქტორი. საქართველო  
E-mail: gmuseliani@gmail.com

### რეცენზენტები:

**კ. წერეთელი**, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერჯეტიკის ფაკულტეტის პროფესორი  
E-mail: tseretelik@gmail.com

**მ. ცეცხლაძე**, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერჯეტიკის ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი  
E-mail: merabi.tsetskhladze@mail.ru

**ანოტაცია.** ელექტრომოწყობილობისა და ელექტროდანადგარების დენგამტარი ნაწილების დამველება ძირითადად არის თერმული პროცესი და უმთავრესად დაიყვანება მათი იზოლაციის დამლაშვით. იზოლაციის დაშლის ხარისხის ერთ-ერთი მაჩვენებელია დიელექტრიკული დანაკარგების კუთხის ტანგენსი, რომლის მნიშვნელობა ექსპლუ-

ტაციის პროცესში ტემპერატურის გაზრდით იზრდება. გარდა დიელექტრიკული დანაკარგების კუთხის ტანგენსისა, იზოლაციის მდგრადობა დამოკიდებულია დატვირთვის დენსა და გარემოს მახასიათებლებზე.

ნაშრომში დამუშავებულია დატვირთვის ქვეშ მომუშავე ძალური ქვესადგურის დანადგარებისა და მოწყობილობების დამველების პროცესების მათემატიკური მოდელი.

მათემატიკური მოდელი დამუშავებულია იზოლაციის ტემპერატურის საწყის მონაცემებზე დაყრდნობით და საშუალებას იძლევა განისაზღვროს  $\theta_1$  და  $\Delta\theta$  მნიშვნელობები, რომლებიც გამოიყენება დაძველების მოდელირებაში.

**საკვანძო სიტყვები:** დაძველების პროცესი; დენგამტარი ნაწილები; დიელექტრიკული დანაკარგების კუთხის ტანგენსი; იზოლაციის ტემპერატურა; მათემატიკური მოდელი; ძალური ქვესადგური.

## შესავალი

ძალური ტრანსფორმატორების მუშა რეჟიმში ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების ტექნიკური მდგომარეობის განსაზღვრისას კომპლექსურ დიაგნოსტიკურ პარამეტრად შეირჩევა დიელექტრიკული დანაკარგის კუთხის ტანგენსი.

დამკვიდრებული წარმოდგენების თანახმად, ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების დენის გამტარი ნაწილების დაძველება თერმული პროცესია და ძირითადად მათი იზოლაციის დაზღაზნა დამოკიდებულია. დაშლის პროცესი ტემპერატურის მატებასთან ერთად აჩქარებს დაძველებას, რის გამოც, ბუნებრივია, უარესდება იზოლაციის მახასიათებლები. ერთ-ერთი ასეთი მახასიათებელია დიელექტრიკული დანაკარგის კუთხის ტანგენსი (tgδ), რომელიც ექსპლუატაციის პროცესში იზრდება.

შექმნილია ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების დენგამტარი ნაწილების იზოლაციის დაძველების „ბაზისური“ მათემატიკური მოდელი, რომელიც სახელდობრ ამ პროცესს აღწერდა tgd-ს ავტომატურად დაჩქარებული ზრდის ტერმინებში (Obraztsov, Y.V., Gleizer, S. E., & Shuvalov, M.Y. 1983). თუმცა, ამ მოდელს მნიშვნელოვანი შეზღუდვა ჰქონდა, ის დროის მოცემულ მომენტში tgd-ს განიხილავდა როგორც რიცხვს, მიუხედავად იმისა, რომ სინამდვილეში tgd ტემპერატურის ფუნქციაა, რომელიც იცვლება დაძველების პროცესში.

## ძირითადი ნაწილი

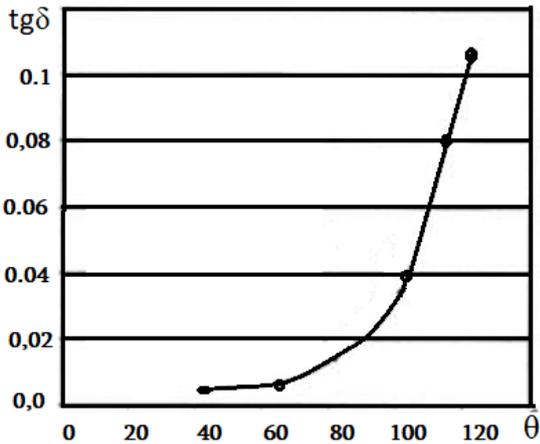
1-ელ სურ-ზე წარმოდგენილია tgd-ს ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკი.

ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების დენგამტარი ნაწილების იზოლაციის დაძველების დახვეწილი მათემატიკური მოდელის საფუძველად, რომელიც ითვალისწინებს ზემოაღნიშნულ პრინციპულად მნიშვნელოვან ფაქტს, მიღებულია შემდეგი დებულებები და დაშვებები:

ა) დაძველების პროცესი შეიძლება დახასიათებული იყოს აქტივაციის ერთი ეფექტური ენერჯიით;

ბ) გარემოს სიმძლავრით დატვირთვა, ტემპერატურა და კუთრი თერმული წინააღობა განიხილება როგორც დროის დეტერმინირებული ფუნქცია. ეს მახასიათებლები დამტკიცებულია არა მხოლოდ სეზონური, არამედ დღე-ღამური რხევებითაც. უფრო მეტიც, მათ შეიძლება ჰქონდეთ სტოხასტური ანუ შემთხვევითი ხასიათი.

გ) კაბელში თბური ველი დროის თითოეულ მოცემულ მომენტში ითვლება კვაზისტაციონარულად. ეს პირობა უზრუნველყოფილია დაძველების ინერციულობით.



სურ. 1. tgδ-ს დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.

დ) დენგამტარი ნაწილების იზოლაცია განიხილება როგორც თავმოყრილპარამეტრებიანი სისტემა. ამ დროს საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისიის სტანდარტში (GOST R IEC 60287-1-1-2022. 2022) მოცემული თბური გაანგარიშებისადმი მიდგომის შესაბამისად დიელექტრიკული დანაკარგები ითვლება თავმოყრილად ელექტროიზოლაციის საშუალო გეომეტრიულ რადიუსზე. გ) და დ) დაშვებების გათვალისწინებით ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების დენგამტარი ნაწილების იზოლაციის ტემპერატურა შეიძლება წარმოდგენილი იყოს შემდეგი გამოსახულებით:

$$\Theta = z + y \cdot \text{tg}\delta \quad (1)$$

სადაც: z და y განისაზღვრება გარემოს  $\Theta_0$  ტემპერატურით, დენგამტარ ძარღვსა და გარსაცმში ჯა-

მური  $P_{\Sigma, \Theta}$  თბოგამოყოფით, სისტემის საერთო თერმული  $R_{\text{სის}}$  წინაღობით, U ძაბვით, C ელექტრული ტევადობით და f სამრეწველო სიხშირით:

ე) ელექტრული იზოლაციის პროცესები, რომელთაც შეიძლება ადგილი ჰქონდეს დაძველების შედარებით ადრეულ სტადიაზე და რომლებიც ახლავან tgδ-ს დროებით შემცირებას, მხედველობაში არ მიიღება.

ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების დენგამტარი ნაწილების იზოლაციისათვის tgδ-ს და  $\Theta$ -ს ურთიერთდამოკიდებულებას ზოგადად აქვს მინიმუმის დამახასიათებელი სახე და გამოისახება შემდეგი ფორმულით (Ovsienko, V.L., Peshkov, I.B., & Shuvalov, M.Y. 2018):

$$\text{tg}\delta(\Theta) = x \cdot \exp(\xi \cdot \Theta) + v \cdot \exp(-\omega \cdot \Theta), \quad (2)$$

სადაც, ყველა პარამეტრი, ანუ x,  $\xi$ , v და  $\omega$  ზოგად შემთხვევაში დაძველების პროცესში შეიძლება იცვლებოდეს დროის მიხედვით. ამასთანავე, ძირითად პრაქტიკულ ინტერესს წარმოადგენს (2) გამოსახულების მარჯვენა ნაწილის პირველი შესაკრები, რომელიც შეესაბამება 1-ელ სურ-ზე მოცემული მრუდის მხარდ შტოს. ეს მტკიცდება tgδ ( $\Theta$ ) დამოკიდებულების ევოლუციის ხასიათით საწყისი მდგომარეობიდან დაძველებისაკენ.

ამიტომ მიზანშეწონილია (2) გამოსახულებაში მეორე შესაკრები შეცვალოთ მუდმივით.

ეს საშუალებას მოგვცემს tgδ-ს დამოკიდებულება დაძველების დროზე რეგულირებადი ტემპერატურის დროს წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$\text{tg}\delta(t, \Theta) = x(t) \cdot e^{\xi \cdot \Theta} + v, \quad (3)$$

სადაც

$$x(t) = x_0 \cdot \exp(t \cdot \alpha(\Theta)), \quad (4)$$

დაძველების სიჩქარის მუდმივა:

$$\alpha(\Theta) = \alpha_0 \cdot \exp(y \cdot \Theta), \quad (5)$$

სადაც  $\alpha_0$  და  $y$  ემპირიული ფორმულებია, ამასთანავე,  $y$  დაძველების აქტივაციის ენერგიის პროპორციულია.

ზემოთ წარმოდგენილ საწყის მონაცემებს და მათემატიკური გარდაქმნების არაერთ დაშვებას მივყავართ დენგამტარი ნაწილების ტემპერატურით გამოწვეული დაძველების მოდელთან, ქვემოთ მოცემული დიფერენციალური განტოლების სახით:

$$\frac{d\theta}{dt} = \alpha_0 \cdot \exp[y \cdot \theta(t)] \cdot \frac{\theta(t) - z(t) - v \cdot y(t)}{1 - \xi \cdot [\theta(t) - z(t) - v \cdot y(t)]} + \frac{dz}{dt} \cdot \frac{1}{1 - \xi \cdot [\theta(t) - z(t) - v \cdot y(t)]} + \frac{[\theta(t) - z(t)] \cdot \frac{dy}{dt}}{1 - \xi \cdot [\theta(t) - z(t) - v \cdot y(t)]} \cdot y(t) \quad (6)$$

მოვახდინოთ შედარება (6) გამოსახულებასა და შესაძლებლობებს შორის, რომლებიც წარმოადგენენ „პირველი თაობის“ მოდელს (Obraztsov, Y.V., Gleizer, S.E., & Shuvalov, M.Y. 1983). უკანასკნელი მუშაობს მხოლოდ  $z$  და  $y$  პარამეტრების ფიქსირებული მნიშვნელობებით. გარდა ამისა, იგი (6)-სთან შედარებით იძლევა რესურსის მომატებულ პროგნოზს, რაც არასასურველია. რაც შეეხება (6) მოდელს, იგი საშუალებას იძლევა გათვალისწინებულ იქნეს არა მხოლოდ დეტერმინირებული, არამედ დატვირთვის დენების შემთხვევითი რხევები და გარემოს თერმული პარამეტრები. ამ შემთხვევაში (6) განტოლება ხდება სტოქასტური დიფერენციალური განტოლება.

მაღალი ძაბვის ელექტროდანადგარებისა და ელექტროტექნიკური მოწყობილობების დენგამტარი ნაწილების თბური მდგრადობის გამოკვლევა ეკვივალენტურია იზოლაციისათვის თბოგამტარობის არაწრფივი დიფერენციალური განტოლების პოვნისა და გადაწყვეტისა:

$$\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\theta}{dr} = - \frac{Q(r)}{\lambda}, \quad (7)$$

სადაც  $r$  არის დაშორება ელექტრომოწყობილობის დენგამტარი ნაწილის ცენტრიდან;  $\lambda$  – კუთრი თბოგამტარობა;  $Q(r)$  – დიელექტრიკული დანაკარგების სიმკვრივე.

(7) განტოლების ამოხსნისათვის სასაზღვრო პირობები ფორმულირდება დენგამტარ ძარღვში, ლითონის ეკრანში და გარსაცმში, ასევე ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობის დენგამტარი ნაწილების კონსტრუქციის ელემენტებისა და გარემოს თერმულ წინააღმდეგობაში დანაკარგების გაანგარიშების მეთოდების გათვალისწინებით, რომელიც წარმოდგენილია საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისიის სტანდარტში (GOST R IEC 60287-1-1-2022. 2022).

ავტომატიზებული გამოთვლებისათვის მოსახერხებელია (7) განტოლება შევცვალოთ პირველი რიგის ორი დიფერენციალური განტოლებისაგან შემდგარი ეკვივალენტური სისტემით:

$$\frac{d\theta(r)}{dr} = \frac{1}{2\pi r \lambda} \cdot [P(r) + P_d];$$

$$\frac{dP(r)}{dr} = \frac{U^2 \cdot f \cdot 2 \cdot \pi [x_0 \cdot e^{\xi \cdot \theta(r)} + v]}{r \cdot g \left[ \int_{r_0}^r \frac{dr}{\epsilon r} \right]^2}, \quad (8)$$

სადაც  $P(r)$  არის დანაკარგები  $r_0$  და  $r$  რადიუსებით შემოსაზღვრულ ცილინდრულ ფენაში,  $P_d$  – დანაკარგები ძარღვში.

პრაქტიკულად ამოცანა წყდება შემდეგი ამოცანების შესრულების გზით:

1. მოცემულია ძარღვის ტემპერატურის  $\theta_0$  მნიშვნელობის რაღაც ინტერვალი, მაგალითად: 20 – 120°C
2.  $\theta_0$ -ს თითოეული მნიშვნელობისათვის რიცხობრივად ამოიხსნება სისტემა (8)

$$\theta(x_0) = \theta_a; \quad P(x_0) = 0 \quad (9)$$

საწყისი პირობების დროს.

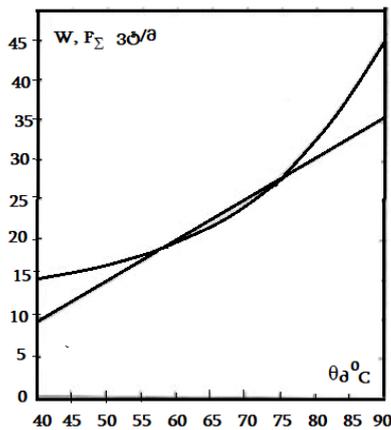
3. (9) გამოსახულების ინტეგრირების შედეგების მიხედვით აიგება კაბელში ჯამური დანაკარგების თბოგამოყოფაზე დამოკიდებულების  $P_{\Sigma}(\theta_a)$  გრაფიკი, რომელიც გაიანგარიშება ელექტრომოწყობილობის დენგამტარი ნაწილის ძარღვსა და იზოლაციაში სითბოს წყაროს სივრცითი განლაგების გათვალისწინებით.

4. იმავე გრაფიკზე გადაიდება სითბოს ართმევის წრფე, რომელიც აღიწერება განტოლებით

$$W(\theta_a) = \frac{\theta_a - \theta_0}{S_{\Sigma}} \quad (10)$$

სადაც  $W(\theta_a)$  არის სითბოს რაოდენობა, რომელიც ართმეულია გარემოში ელექტრომოწყობილობის დენგამტარი ნაწილებიდან;  $S_{\Sigma}$  – ძარღვიდან სათავსში თბოგადაცემის საერთო წინაღობა.

ამრიგად, მიღებული გრაფიკი წარმოადგენს თბომდგრადობის დიაგრამას, რომლის მაგალითი ნაჩვენებია მე-2 სურ-ზე.



სურ. 2. თბური მდგრადობის დიაგრამის მაგალითი

მე-2 სურ-ზე სწორი ხაზი ასახავს ართმეული სითბოს რაოდენობის  $W$  დამოკიდებულებას ძარღვის  $\theta_a$  ტემპერატურაზე, ხოლო მრუდი ასახავს

ენერჯიის დანაკარგების  $P_{\Sigma}$  დამოკიდებულებას ელექტრომოწყობილობის დენგამტარი ნაწილის  $\theta_a$  ტემპერატურაზე. ორივე ხაზის გადაკვეთის წერტილები შეესაბამება თბოგამტარობის განტოლების ამონახსნებს, მანძილი მათ შორის შესაბამება თერმული მდგრადობის რეზერვს.

ზოგად შემთხვევაში,  $W(\theta_a)$  სწორ ხაზს და  $P_{\Sigma}(\theta_a)$  მრუდს აქვთ მდგრადი თერმული რეჟიმის შესაბამისი ორი საერთო წერტილი. ამავე დროს, ქვედა წერტილი ( $\theta_{a1}$ ) შეესაბამება მდგრად მდგომარეობას, ზედა ( $\theta_{a2}$ ) კი - არამდგრად მდგომარეობას. თერმული მდგრადობის საზომად მიღებულია მითითებულ ტემპერატურებს შორის სხვაობა:

$$\Delta\theta_a = \theta_{a2} - \theta_{a1} \quad (11)$$

თუ რაიმე მიზეზით ელექტრომოწყობილობის დენგამტარ ნაწილებში ენერჯიის დანაკარგები გაიზრდება და/ან სითბოს ართმევის პირობები გაუარესდება, მაშინ  $P_{\Sigma}(\theta_a)$   $W(\theta_a)$  მრუდი სწორი ხაზის მიმართ ზემოთ გადაინაცვლებს.

ამ დროს  $\Delta\theta_a$  შემცირდება და რაღაც მომენტში  $\Delta\theta_a=0$  დროს, ხაზი  $P_{\Sigma}(\theta_a)$  მხოლოდ შეეხება  $W(\theta_a)$  ხაზს. ამ შემთხვევაში, სითბოს მდგრადობის მარაგი მთლიანად დაიხარჯება და დატვირთვის, ძაბვის, გარემოს ტემპერატურის, გარემოს თბური წინაღობის ან  $t_{\text{გბ}}$ -ს უმცირესი ზრდითაც კი მოხდება თერმული გარღვევა.

თუ გაანგარიშებული  $P_{\Sigma}$  მრუდი იქნება  $W$  ხაზის ზემოთ, ამ შემთხვევაში სტაციონარული მდგომარეობა პრინციპში შეუძლებელია.

ზემოაღნიშნულის შესაბამისად შესრულებული გამოთვლები საშუალებას იძლევა მივიღოთ  $\theta_{a1}$  და  $\Delta\theta_a$  მნიშვნელობები, ასევე ტემპერატურის მნიშვნე-

ლობები იზოლაციის გეომეტრიულ საშუალო რადიუსზე. ტემპერატურის მნიშვნელობები, რომლებიც გამოიყენება დამველების მოდელირებაში.

### დასკვნა

ამრიგად, ელექტროდანადგარებისა და ელექტრომოწყობილობების დენგამტარი ნაწილების იზო-

ლაციის საწყის მონაცემებზე დაფუძნებული მდგრადობის ანალიზი უფრო მოსახერხებელი და გამართლებულია იმით, რომ იზოლაციის ტემპერატურა დამოკიდებულია სისტემის ყველა პარამეტრზე: დატვირთვის დენებზე, დიელექტრიკული დანაკარგების კუთხის ტანგენსზე (tgδ) და გარემოს მახასიათებლებზე.

### ლიტერატურა

1. Obratsov, Y. V., Gleizer, S. E., & Shuvalov, M. Y. (1983). Influence of dielectric losses on the thermal aging of oil-filled cables. *Electrotechnics*, (12).
2. GOST R IEC 60287-1-1-2022. (2022). *Electric cables – Calculation of the rated current. Part 1-1: Methods for calculation of rated current (100% load factor) and loss calculation. General provisions, Part 202, thermal resistance – calculation of thermal resistance*.
3. Ovsienko, V. L., Peshkov, I. B., & Shuvalov, M. Y. (2018). Assessment of the residual life of oil-filled cable lines through mathematical modeling of the aging process of their electrical insulation. *Proceedings of the Academy of Electrical Sciences of the Russian Federation*, (12).

UDC 621.316.99

SCOPUS CODE 2100

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-1-97-103>

## Modeling of Aging Processes of Live Parts of Electrical Equipment of Substations Operating Under Load

**Tengiz Museliani**

Georgian Technical University, Faculty of Energy, Professor, Georgia  
E-mail: museliani@yahoo.com

**Kakha Giorgadze**

Georgian Technical University, Faculty of Energy, doctoral student, Georgia  
E-mail: kaxagiorgaze@gmail.com

**Grigol Museliani**

Georgian Technical University, Faculty of Energy, Professor, Academic Doctor of Electrical Engineering in Power Engineering, Georgia  
E-mail: gmuseliani@gmail.com

### Reviewers:

**K. Tsereteli**, Georgian Technical University, Faculty of Energy, Professor  
E-mail: tseretelik@gmail.com

**M. Tsetskhladze**, Georgian Technical University, Faculty of Energy, Associate Professor  
E-mail: merabi.tsetskhladze@mail.ru

**Abstract.** The paper develops a mathematical model of the aging processes of power substation equipment and devices operating under load. The aging of current-carrying parts of electrical equipment and devices is mainly a thermal process and is mainly reduced to the breakdown of their insulation. One of the indicators of the degree of insulation breakdown is the tangent of the dielectric loss angle, the value of which increases with increasing temperature during operation. In addition to the tangent of the dielectric loss angle, the stability of the insulation depends on the load current and environmental characteristics.

The mathematical model is developed based on the initial data of the insulation temperature and allows determining the values of  $\theta\delta_1$  and  $\Delta\theta\delta$ , which are used in aging modeling.

**Keywords:** Aging process; Dielectric loss tangent; Electrical parts; Insulation temperature; Mathematical model; Power substation.

---

*განხილვის თარიღი 27.10.2025*

*შემოსვლის თარიღი 26.12.25*

*ხელმოწერილია დასაბეჭდად 25.03.2026*