

УДК 621.3.011

DOI: [10.62717/2221-4550-2025-1-073](https://doi.org/10.62717/2221-4550-2025-1-073)

Буковський О.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: obukovskiy@gmail.com

Вислоух С.П.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID [0000-0002-2204-2602](https://orcid.org/0000-0002-2204-2602)

E-mail: vsp1@ukr.net

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ МІЖБЛОКОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ

Анотація. Розглянуто питання моделювання параметрів стану міжблокових електричних з'єднань на завершальному етапі виробництва кабельно-провідникової продукції. Створена модель враховує вплив температурних змін, електричних навантажень та вищих гармонік на теплові та електричні характеристики ізоляційних матеріалів. Проведено аналіз факторів, що призводять до деградації ізоляції, та запропоновано підхід до прогнозування її стану в умовах експлуатації. Результати дослідження сприяють удосконаленню автоматизованих систем контролю для підвищення якості та безпеки електричних систем.

Ключові слова: кабельно-провідникова продукція, міжблокові електричні з'єднання, параметри стану ізоляції, математична модель, автоматизований контроль.

O. Bukovskyi

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

E-mail: obukovskiy@gmail.com

S. Vysloukh

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID [0000-0002-2204-2602](https://orcid.org/0000-0002-2204-2602)

E-mail: vsp1@ukr.net

MATHEMATICAL MODELING OF INTER-BLOCK ELECTRICAL CONNECTION PARAMETERS

Abstract. This paper addresses the mathematical modeling of the parameters characterizing the state of inter-block electrical connections at the final stage of cable and wire production. The developed model considers the influence of temperature variations, electrical loads, and higher harmonics on the thermal and electrical characteristics of the insulation materials. An analysis of factors leading to insulation degradation is conducted, and a method for predicting its operational state is proposed. The research results contribute to the improvement of automated control systems for enhancing the quality and safety of electrical systems.

Keywords: cable and wire products, inter-block electrical connections, insulation state parameters, mathematical model, automated control.

Сучасні електричні системи, включаючи ті, що застосовуються в приладобудівній галузі, висувають високі вимоги до їх надійності та безпечного використання. Важливим елементом таких систем є міжблокові електричні з'єднання, стан ізоляції яких суттєво впливає на їхню працездатність. Зростання складності конструкцій та щільності компонентів підвищує актуальність контролю параметрів ізоляції, оскільки деградація матеріалів може призвести до аварійних ситуацій [1]. У роботі досліджено вплив зовнішніх факторів, таких як температурні коливання, струми навантаження та вищі гармоніки, на стан ізоляції, а також розроблено математичну модель для оцінки її електричного опору та теплового режиму.

Проблема деградації ізоляції ускладнюється впливом вищих гармонік, які виникають через підключення нелінійних електричних приймачів та наявність гармонік напруги в точках з'єднання [2]. Ці гармоніки спричиняють додаткові теплові навантаження, що призводять до перегріву ізоляції та скорочення терміну її служби. Для аналізу цього процесу використано статистичні дані щодо нагрівання, враховуючи струми основної частоти, зворотної послідовності та вищих гармонік, усереднені за інтервалом часу $\Delta t = 4 \cdot T_\theta$.

Математична модель параметрів стану з'єднань базується на розрахунку електричного опору провідника змінного струму з урахуванням ефектів поверхні та близькості. Опір провідника з використанням змінного струму визначається за формулою [3]:

$$R_{\text{зм.стр.}} = R_{\text{пост.стр.}} \cdot (1 + y_n + y_\delta),$$

де y_n — коефіцієнт поверхневого ефекту, y_δ — коефіцієнт ефекту близькості, $R_{\text{пост.стр.}}$ — опір провідника з використанням постійного струму, який розраховується наступним чином:

$$R_{\text{пост.стр.}} = \frac{(1 + k_0) \cdot l \cdot \rho_{20}}{S_{\text{пров.}}} \cdot (1 + \alpha_{20}(T_{\text{пров.}} - 20)),$$

де ρ_{20} — питомий опір матеріалу провідника при 20°C , l — довжина провідника, $S_{\text{пров.}}$ — площа поперечного перерізу, α_{20} — температурний коефіцієнт, $T_{\text{пров.}}$ — робоча температура, k_0 — коефіцієнт скручування.

Для вищих гармонік опір R_n розраховується з урахуванням номера гармоніки n :

$$R_n = R_{\text{зм.стр.}} \cdot (0,187 + 0,532 \cdot \sqrt{n}).$$

Теплові втрати від несинусоїдальних струмів у фазних провідниках визначаються як:

$$\sum P_\phi = I_1^2 \cdot R_1 + \sum_{n=2}^{40} I_n^2 \cdot R_n,$$

а в нейтральному провіднику — як:

$$\sum P_{\text{нейтр.}} = 3 \cdot \sum_{n=3,9,15\dots} I_n^2 \cdot R_n.$$

Загальні активні втрати потужності для трифазного кабелю з нейтраллю враховують як фазні, так і нейтральні втрати:

$$P_\Sigma = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \cdot K_{\text{втр}},$$

де $K_{\text{втр}}$ — коефіцієнт, що враховує гармонічні складові.

Температура ізоляції розраховується за тепловим законом Ома:

$$\Delta T = P \cdot S,$$

де S — тепловий опір кабельних елементів, що залежить від конструктивних параметрів (товщини ізоляції, діаметра провідників тощо); P — потужність (теплові втрати) в кабелі. Для чотирижильного кабелю температура ізоляції визначається як:

$$\tau_{\text{ізол.}} = P_\phi \cdot S_1 + 3 \cdot P'_\phi (S_2 + S_3 + S_4) + \tau_{\text{от.сер.}}$$

де $\tau_{\text{ізол.}}$ — температура ізоляції; P_{ϕ} — теплові втрати у фазних провідниках; S_1, S_2, S_3, S_4 — теплові опори окремих провідників; P'_{ϕ} — теплові втрати в нейтральному провіднику; $\tau_{\text{от.сер}}$ — температура навколишнього середовища.

Скорочення терміну служби ізоляції через теплове старіння оцінюється за рівнянням Арреніуса:

$$V_{\text{ізол.}} = V_{\text{ном.}} \cdot \exp\left(-K_a \left(\frac{1}{\theta_{\text{ном.}}} - \frac{1}{\theta_{\text{ізол.}}}\right)\right),$$

де $V_{\text{ном.}}$ — номінальна напруга; $\theta_{\text{ізол.}}$ — робоча температура ізоляції; $K_a = \frac{E_a}{R}$, E_a — енергія активації, R — газова стала.

Розроблена модель, що базується на розрахунку електричного опору з урахуванням поверхневого ефекту та ефекту близькості, а також на застосуванні рівняння Арреніуса для оцінки теплового старіння ізоляції дозволяє прогнозувати стан ізоляції за умов змінних навантажень та температур, виявляти потенційні дефекти та оцінювати максимальні допустимі режими роботи. Отримані результати моделювання підтверджують необхідність інтеграції таких моделей в автоматизовані системи контролю для підвищення якості кабельної продукції, що є особливо важливим для приладобудівних застосувань, де надійність з'єднань є критичною.

Список використаних джерел

1. Li Z., Zhang S., Grzybowski S. & Liu Y. Characteristics of moisture diffusion in vegetable oil-paper insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(5), pp. 1650-1656.
2. Буковський О.М. "Automation of the process of monitoring the parameters of interblock electrical connections." / О.М. Буковський, С.П. Вислоух // Вісник Хмельницького національного університету. Серія Технічні науки. — 2024. — № 1. — pp. 325-329.
3. Bukovskyi O.M, Vysloukh S.P. Efficiency of adaptive algorithms for controlling the parameters of interblock electrical connections // Перспективні технології та прилади. Збірник наукових праць, Випуск 25, грудень 2024 р. — Луцьк Луцький національний технічний університет, 2024. — pp. 7-11. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2024-25