

***В. М. ЗОЛОТАРЬОВ, С. Ю. АНТОНЕЦЬ, А. Л. ОБОЗНИЙ, Ю. П. АНТОНЕЦЬ, Ю. Г. ГОНТАР,
Л. А. ЩЕБЕНЮК, О. Г. КЕССАЄВ***

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ ІЗ ЗШИТОЮ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

В роботі розглянуто сучасний нормативний підхід до визначення навантажувальної здатності силових кабелів зі зшитим поліетиленовим ізоляцією та запропоновано застосування моделі визначення допустимих струмових навантажень конкретного кабелю середньої напруги з ізоляцією зі зшитого поліетилену для дослідження його перевантажувальної здатності в умовах виробництва, розглянуто результати її експериментальної перевірки. Силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену мають безперечні переваги перед традиційними маслоснаповненими, що зумовило їх повсюдне застосування у всіх розвинених країнах і помітне скорочення використання інших типів кабелю. Актуальність дослідження зумовлена зміною методів випробування напругою кабелів зі зшитим поліетиленовим ізоляцією в усьому світі. В стаціонарному тепловому режимі (100 % коефіцієнт навантаження) за діючими міжнародними стандартами ІЕС (серія 60287) навантажувальну здатність визначають як гранично допустимий (номінальний) струм, який залежить від теплофізичних параметрів конкретного кабелю і від нормованих теплофізичних параметрів навколишнього середовища. Запропоновано використання математичної моделі, яка за рахунок поєднання конструктивних і теплофізичних параметрів конкретного кабелю з умовами зовнішнього середовища при прокладанні в повітрі, дозволяє визначити параметри стаціонарного теплового режиму кабелю за будь-якого тривалого струму навантаження. Показана можливість побудови номограм для визначення параметрів допустимих перевантажень кабелів зі зшитим поліетиленовим ізоляцією середньої напруги в діапазоні тривалих струмових навантажень в експлуатації. Робота спрямована на подальше дослідження конструкції зовнішніх захисних покриттів кабелю зі зшитим поліетиленовим ізоляцією на динаміку його нагрівання з метою створення методу випробувань на перевантажувальну здатність конкретного кабелю з ізоляцією зі зшитого поліетилену в умовах виробництва.

Ключові слова: силовий кабель середньої напруги, ізоляція зі зшитого поліетилену, пропускна здатність, модель теплового балансу, допустимий струм, теплофізичні параметри.

***В. М. ЗОЛОТАРЕВ, С. Ю. АНТОНЕЦ, А. Л. ОБОЗНИЙ, Ю. А. АНТОНЕЦ, Ю. Г. ГОНТАРЬ,
Л. А. ЩЕБЕНЮК, А. Г. КЕССАЕВ***

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ СО СШИТОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В работе рассмотрен современный нормативный подход к определению нагрузочной способности силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией и предложено применение модели определения допустимых токовых нагрузок конкретного кабеля среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена для исследования его перегрузочной способности в условиях производства. Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена имеют несомненные преимущества перед традиционными маслоснаполненными, что обусловило их повсеместное применение во всех развитых странах и заметное сокращение использования других типов кабелей. Актуальность исследования обусловлена изменением методов испытания напряжением кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией во всем мире. В стационарном тепловом режиме (100% коэффициент нагрузки) по действующим международным стандартам ІЕС (серия 60287) нагрузочную способность определяют как предельно допустимый (номінальний) ток, который зависит от теплофизических параметров конкретного кабеля и от нормированных теплофизических параметров окружающей среды. Предложено использование математической модели, которая за счет сочетания конструктивных и теплофизических параметров конкретного кабеля с условиями внешней среды при прокладке в воздухе позволяет определять параметры стационарного теплового режима кабеля при любом длительном нагрузочном токе. Показана возможность построения номограмм для определения параметров допустимых нагрузок кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией среднего напряжения в диапазоне длительных токовых нагрузок в эксплуатации. Работа направлена на дальнейшие исследования конструкции внешних защитных слоев кабеля со сшитой полиэтиленовой изоляцией на динамику его нагрева с целью создания метода испытаний на перегрузочную способность конкретного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в условиях производства.

Ключевые слова: силовой кабель среднего напряжения, изоляция из сшитого полиэтилена, пропускная способность, модель теплового баланса, допустимый ток, теплофизические параметры.

***V. ZOLOTAROV, S. ANTONETS, A. OBOZNYI, YU. ANTONETS, YU. GONTAR, L. SHCHEBENIUK,
O. KIESSAIEV***

RESEARCH OVERLOAD CAPABILITY POWER CABLES MEDIUM VOLTAGE OF XLPE INSULATION

The modern normative approach to determining the load capacity of power cables with cross-linked polyethylene insulation is considered and the application of the model of determining the allowable current loads of a specific medium voltage cable with cross-linked polyethylene insulation to study its overload capacity in production conditions. Power cables with cross-linked polyethylene insulation have clear advantages over traditional oil-filled ones, which has led to their widespread use in all developed countries and a significant reduction in the use of other types of cable. The relevance of the study is due to changes in voltage testing methods of cables with cross-linked polyethylene insulation around the world. In stationary thermal mode (100% load factor) according to current international standards IEC (series 60287) load capacity is defined as the maximum allowable (rated) current, which depends on the thermophysical parameters of a particular cable and the normalized thermophysical parameters of the environment. The use of mathematical model is proposed, which due to the combination of structural and thermophysical parameters of a particular cable with environmental conditions during laying in air allows to determine the parameters of stationary thermal regime of the cable for any long load current. The possibility of constructing nomograms for determining the parameters of permissible loads of cables with cross-linked polyethylene insulation of medium voltage in the range of long-term current loads in operation is shown. The work is aimed at further studies of the design of the outer protective coatings of cable

© В. М. Золотарьов, С. Ю. Антонець, А. Л. Обозний, Ю. П. Антонець, Ю. Г. Гонтар, Л. А. Щебенюк, О. Г. Кессаєв, 2021

with cross-linked polyethylene insulation on the dynamics of its heating in order to create a method of testing the overload capacity of a particular cable with cross-linked polyethylene insulation in production conditions.

Keywords: medium voltage power cable, cross-linked polyethylene insulation, transmission capacity, thermal balance model, allowable current, thermophysical parameters.

Вступ. Кабельні лінії середньої напруги є основою систем електропостачання промислових підприємств, комунальних та побутових об'єктів [1–4]. Тенденції їх розвитку полягають у використанні в електричних мережах силових кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) [2,5]. Такі кабелі мають ряд особливостей, які впливають на тепловий режим як робочому, так і в аварійному режимах в експлуатації:

- більша, ніж у традиційних маслонаповнених кабелів, допустима температура ізоляції (90 °С), що зумовлює залежність процесу нагрівання кабелю від теплофізичних параметрів елементів конструкції і суттєве збільшення навантажувальної здатності [6, 7];

- суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури (питома теплоємність поліетилену при температурі 20 °С складає 2300 Дж/кг·°С, а при 80 °С – 3750 Дж/кг·°С) та наявність елементів конструкції з високим питомим тепловим опором (до 50 °С·м/Вт), що змінює тепловий режим роботи ізоляції порівняно з режимом роботи традиційних маслонаповнених кабелів [7–10].

Ці особливості створюють додаткові проблеми при визначенні допустимих струмових навантажень в умовах експлуатації, які для маслонаповнених кабелів вирішувались на основі майже півторастолітнього досвіду їх дослідження і експлуатації [4, 6, 12, 15].

Застосування більш нагрівостійкої твердої полімерної ізоляції в високовольтних кабелях змінило не тільки тепловиділення в жилі і температуру ізоляції, змінилися електрофізичні і теплофізичні процеси в ізоляції. Зокрема в макроскопічно однорідному твердому полімері під дією сильного постійного електричного поля утворюються об'ємні електричні заряди, що в свою чергу повністю змінило методи випробування напругою ЗПЕ-кабелів в усьому світі [9, 11–15].

Саме особливості електрофізичних і теплових процесів в макроскопічно однорідному твердому полімері разом із значним підвищенням допустимої температури ізоляції зумовили те, що в ізоляції ЗПЕ-кабелю зосереджено дію максимальних енергетичних впливів, теплового, електричного і механічного, при цьому внутрішні механічні напруження в полімерах зумовлені, в першу чергу саме різницею температур в об'ємі полімеру [7, 9, 11, 13].

Тому для сучасних ЗПЕ-кабелів основною науковою проблемою є дослідження процесів одночасного впливу максимальних енергетичних навантажень (теплового, електричного і механічного) на макроскопічно однорідний твердий полімер в умовах експлуатації. Нерозривною з нею є проблема визначення граничних струмових навантажень на кабель із зшитою поліетиленовою ізоляцією в умовах виробництва і експлуатації [13, 18, 19, 21]. Ця проблема

може вирішуватись тільки на основі універсальної моделі теплового балансу: гранично допустима потужність тепловиділення обмежена потужністю, що може бути відведена в оточуюче середовище [10, 14–15]. Саме тепловий баланс визначає допустимі теплові й електричні навантаження [7].

Тому дослідження перевантажувальної здатності ЗПЕ-кабелів є необхідним для вирішення наукових і технічних проблем впровадження інноваційної для вітчизняної кабельної техніки продукції.

Аналіз літератури. Одночасний вплив максимальних енергетичних навантажень (теплового, електричного і механічного) на реальний типовий ЗПЕ-кабель аналізують емпірично шляхом співставлення розрахованих граничних струмових навантажень з результатами тривалих випробувань за цих навантажень: випробування long term test [4, 7, 19, 20]. Такі випробування є тривалими і дорогими, відповідно до них ЗПЕ-кабелі піддають сотням циклів нагріву з одночасною дією напруги, в процесі дії циклів нагріву контролюють всі основні параметри:

- електричні (тангенс кута діелектричних втрат, рівень часткових розрядів);
- теплові (температура в елементах конструкції кабелю і на його поверхні).

В той же час пропускна спроможність силових кабелів визначається виключно розрахунком в номінальних умовах, тобто в стаціонарному режимі навантаження (100 % коефіцієнт навантаження) [7, 8]. Відповідно, номінальний струм I_n – необмежене тривалий, за якого встановлюється максимальна температура жили при номінальних умовах оточуючого середовища [7, 8, 13].

Оскільки в умовах експлуатації кабель практично ніколи не працює в стаціонарному гранично допустимому режимі, то для перевірки працездатності конкретних кабелів використовують або спеціальні лабораторії [10, 20], або кабель приймають під гарантії виробника. Останнє означає необхідність відповідних досліджень у виробника.

Очевидно, що нормовані розрахунки є необхідними, але для інноваційної продукції, яка суттєво відрізняється від традиційної, використання тільки нормованих методів є недостатнім. Наприклад, в роботі [11] запропоновано метод використання універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло і масообміну в високовольтних кабелях з пластмасовою ізоляцією для дослідження їх пропускної спроможності шляхом інтервального оцінювання параметрів моделей. Показано, що для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією необхідне спільне вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові параметри кабелю [7, 11, 13].

Мета роботи. Розробити і перевірити експериментально в умовах виробництва модель визначення допустимих струмових перевантажень конкретного кабелю середньої напруги з ізоляцією із зшитого поліетилену.

Одержані результати. В основу визначення граничних струмових навантажень на кабель із зшитого поліетиленовою ізоляцією покладено аналогію процесів тепломасообміну, зокрема процесів перенесення зарядів і процесу перенесення тепла [7, 13]. Відповідні моделі однакові за своєю структурою, вони включають базові різницю потенціалів (електричних чи теплових), потік, опір, провідність. Відповідно всі інші елементи моделей, що описують той чи інший процес, є похідними від цих величин, і математичний опис того чи іншого процесу в системі диференціальних рівнянь є досить універсальним та уніфікованим [13, 16]. Саме цей підхід застосовано в усіх модифікаціях розрахункових моделей граничного струмового навантаження конкретних конструкцій силових кабелів в діючих міжнародних стандартах [8, 20].

Розрахунок потужності тепловиділення кабелю, що складається з втрат в жилі, діелектричних втрат та електромагнітних втрат в металевих захисних елементах конструкції визначений нормативною міжнародною документацією для широкого спектру конкретних конструкцій силових кабелів [8]. При використанні [8] для ЗПЕ-кабелю діелектричними втратами за промислової частоти (десяті долі Вт/м) можна знехтувати порівняно із втратами в жилі (кілька сотень Вт/м) [13]. Відтак потужність тепловиділення кабелю P_k є сумою втрат в жилі P_g і в металевих елементах конструкції, серед яких обов'язковим є мідний екран, втрати в якому пропорційні втратам в жилі, оскільки за своєю природою є індукційними втратами:

$$P_k = P_g + P_e = I^2 R_g(\Theta_g) + I^2 R_g(\Theta_g)k_e, \quad (1)$$

де k_e – коефіцієнт взаємодіяції між жилою та екраном, $k_e = P_e / P_g = \omega^2 M^2 R_c / (R_c^2 + \omega^2 M^2) R_g$;

ω – кругова частота;

R_c – електричний опір мідного екрану за температури екрану в даному режимі навантаження;

$R_g(\Theta_g)$ – електричний опір жили за температури жили в даному стаціонарному режимі навантаження [13].

Для розрахунку потужності теплового потоку, який може бути переданий від кабелю до оточуючого середовища є застосовними методи розрахунку електричних ланцюгів [9, 10]. Якщо елементи конструкції кабелю – це послідовно нанесені радіальні шари різних матеріалів, а границі між ними є ізотермами, то різниця температур τ_i (різниця потенціалів) на i -му елементі конструкції дорівнює добутку потужності теплового потоку P_i через цей елемент на його тепловий опір S_i : $\tau_i = P_i \cdot S_i$, а сума різниць температур на всіх коаксіальних n -елементах конструкції є різницею температур між жилою Θ_g і поверхнею кабелю Θ_s :

$$\Theta_g - \Theta_s = \sum P_i \cdot S_i, \text{ де } i = 1 \dots n. \quad (2)$$

Формула (2) визначає різницю температур між жилою Θ_g і поверхнею кабелю Θ_s для конструкцій ЗПЕ-кабелю без металеві герметизуючої оболонки і металеві броне [7,13]. Відповідно для одножильного кабелю застосовна відома нормативна формула для визначення граничного струмового навантаження I в стаціонарному тепловому режимі і при температурі оточуючого середовища Θ_o [8]:

$$I = \{(\Theta_g - \Theta_o) / R_g(\Theta_g) \cdot [S_1 + (1 + k_e)(S_2 + S_3)]\}^{0.5} \quad (3)$$

де S_1, S_2, S_3 – відповідно теплові опори ізоляції, захисних покривів і оточуючого середовища.

Визначення теплових опорів елементів конструкції кабелю як послідовно нанесених радіальних шарів різних матеріалів, границі між якими є ізотермами, основане на відомій моделі радіального теплового потоку. Але тепловий потік від поверхні кабелю до оточуючого середовища, наприклад повітря, не є ні симетричним, ні стабільним в часі чи в просторі [18]. Він включає процеси теплопередачі через теплопровідність (міжмолекулярний процес передачі тепла), конвективний теплообмін (перемішування часток речовини з різною температурою в просторі), випромінювання (передача електромагнітної енергії від більш нагрітого тіла) [16, 18].

Наприклад, для визначення коефіцієнту теплопередачі з поверхні силових кабелів у повітрі є рекомендації відповідних міжнародних стандартів у вигляді емпіричних графічних залежностей ключових теплофізичних параметрів від конкретних умов прокладання кабелю в повітрі [8, 19]. Тому визначення потужності теплового потоку, який може бути переданий з поверхні кабелю в оточуюче середовище в кожному конкретному випадку має бути перевірено і розрахунком, і експериментально, а особливо для інноваційних конструкцій з суттєвими конструктивними і теплофізичними особливостями.

Наприклад, в [11] для конкретного високовольтного ЗПЕ-кабелю на напругу 110 кВ прокладеного експериментально показано, що для кабелів відносно великого діаметру коефіцієнт теплопередачі α з поверхні горизонтально розташованого кабелю у повітрі визначається як конвекцією, так і випромінюванням (внеском випромінювання в охолодження кабелю в повітрі не можна знехтувати [7, 11]). Значення α є залежним нелінійно від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$, і не може бути використаним в теплових розрахунках кабелю як незмінний параметр. Відповідно тепловий опір повітря, який загалом визначають відомою формулою

$$S_3 = (\pi d \alpha)^{-1}, \quad (4)$$

де d – діаметр кабелю, який теж залежить нелінійно від різниці температур поверхні кабелю і довкілля $\Delta\Theta_s$ [7].

Тобто застосовними є рекомендації міжнародної електротехнічної комісії [8] визначати коефіцієнт

теплопередачі α з поверхні кабелю як функцію двох параметрів:

$$\alpha = h \cdot \Delta\theta_s^m, \quad (5)$$

де h – коефіцієнт теплового розсіяння з поверхні кабелю, Вт/м²К^{5/4};

$\Delta\theta_s = \theta_s - \theta_o$ – різниця температур поверхні кабелю і довкілля.

Відповідно до двох основних процесів охолодження кабелю в повітрі (конвективного теплообміну і випромінювання) α може бути представлене сумою відповідно до нормативної формули (5) [7, 8, 13]:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_b = (h_k + h_b) \cdot \Delta\theta_s^m, \quad (6)$$

де α_b – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням;

α_k – коефіцієнт теплопередачі конвекцією, інтенсивність якої характеризує спеціальний критерій Нуссельта Nu :

$$\alpha_k = Nu \lambda / d,$$

де d – діаметр циліндричного горизонтально розташованого твердого тіла;

λ – питома теплопровідність повітря, $\lambda = 0,025$ Вт/(м·К),

Значення Nu в свою чергу визначається порядком добутку двох інших теплофізичних критеріїв, – Грасгофа Gr і Прандтля Pr , значення яких традиційно використовують для визначення параметрів охолодження кабелів у повітрі [13]:

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / d = C_1 (Gr \cdot Pr)^m \cdot \lambda / d; \quad (7)$$

$$Gr = \beta \cdot \Delta\theta_s \cdot d^3 \cdot g / \nu^2; \quad (8)$$

$$Pr = \nu c / \lambda, \quad (9)$$

де β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря, $\beta = 1/T_{cp}$, К⁻¹, де T_{cp} – середня абсолютна температура повітря;

$\Delta\theta_s$ – різниця температур поверхні кабелю θ_s і довкілля θ_o : $\Delta\theta_s = \theta_s - \theta_o$;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²;

ν – кінематична в'язкість повітря, $\nu = 14,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

c – питома теплоємність повітря, $c = 1,01 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).

C_1, m – параметри критерію Нуссельта, які залежать від добутку критерію Грасгофа Gr і Прандтля Pr і дорівнюють $C_1 = 0,54$; $m = 0,25$ [7, 13].

Спільний вираз за (5)...(9) дає можливість аналітично виразити коефіцієнт теплового розсіяння при конвекції як функцію різниці температур $\Delta\theta_s$ між поверхнею кабелю і віддаленим від кабелю повітряним середовищем, що є необхідним параметром для визначення навантажувальної здатності [10, 13]:

$$h_k = C_1 (\beta \cdot d^3 \cdot g \cdot \nu^{-1} \cdot c \cdot \lambda^{-1})^m \cdot \lambda / d. \quad (10)$$

Коефіцієнт відведення тепла з поверхні кабелю

випромінюванням за законом Стефана-Больцмана [7]:

$$\alpha_b = \varphi \cdot \varepsilon_t \cdot C_0 (T_s^4 - T_o^4) / (T_s - T_o), \quad (11)$$

де C_0 – постійна Стефана-Больцмана, $C_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴);

φ – коефіцієнт, який для окремо прокладеного в повітрі кабелю дорівнює 1;

ε_t – коефіцієнт чорноти, який для окремо прокладеного в повітрі кабелю в полімерній оболонці знаходиться в діапазоні від 0,8 до 0,9;

T_s, T_o – абсолютні температури поверхні нагрітого тіла і оточуючого середовища [7, 11, 13].

Оскільки α_k і α_b є функціями різниці температур поверхні нагрітого тіла і оточуючого середовища, позначеної в (5) як $\Delta\theta_s$, зручно для подальших розрахунків записати формулу (11) як функцію $\Delta\theta_s$:

$$\alpha_b = \varepsilon_t \cdot C_0 \Delta\theta_s^{-1} \cdot [(\theta_o + \Delta\theta_s + 273)^4 - (\theta_o + 273)^4], \quad (12)$$

де θ_o – температура оточуючого середовища, °С.

Відповідно коефіцієнт теплового розсіяння при випромінюванні h_b (Вт/м²К^{5/4}) запишеться як функція $\Delta\theta_s$ [7]:

$$h_b = \varepsilon_t C_0 \Delta\theta_s^{-1} [(\theta_o + \Delta\theta_s + 273)^4 - (\theta_o + 273)^4] \Delta\theta_s^{-m}, \quad (13)$$

У підсумку коефіцієнт теплового розсіяння при конвекції і випромінюванні для горизонтально розташованого окремо прокладеного в повітрі кабелю в полімерній зовнішній оболонці діаметром d :

$$h = h_b + h_k = \varepsilon_t C_0 \Delta\theta_s^{-1} [(\theta_o + \Delta\theta_s + 273)^4 - (\theta_o + 273)^4] \cdot \Delta\theta_s^{-m} + C_1 (\beta \cdot d^3 \cdot g \cdot \nu^{-1} \cdot c \cdot \lambda^{-1})^m \cdot \lambda / d, \quad (14)$$

де ключова для визначення коефіцієнту теплового розсіяння h змінна $\Delta\theta_s$, яка спільно з зовнішнім діаметром кабелю d визначає тепловий опір навколишнього середовища може бути орієнтовно оцінена експериментально $\Delta\theta_s^*$ для конкретного ЗПЕ-кабелю в конкретних умовах шляхом визначення температури поверхні кабелю з урахуванням (2) (неруйнівне випробування) в заданому режимі струмового навантаження I :

$$\Delta\theta_s = \theta_g - \theta_o - I^2 R_g [S_1 + (1 + k_e) S_2], \quad (15)$$

де θ_g – задана змінна, гранична температура жили, задана за умовами експлуатації;

k_e – коефіцієнт втрат в металевій оболонці кабелю;

S_1, S_2 – відповідно, тепловий опір системи ізоляції і захисних покривів [11, 13, 18].

На рис.1 співставлено результати розрахунку коефіцієнту теплового розсіяння h за (14) спільно з нормативним рівнянням для стаціонарного теплового режиму для ЗПЕ-кабелю діаметром 37 мм з діапазоном можливих значень h за рекомендаціями МЕК [7, 8, 13].

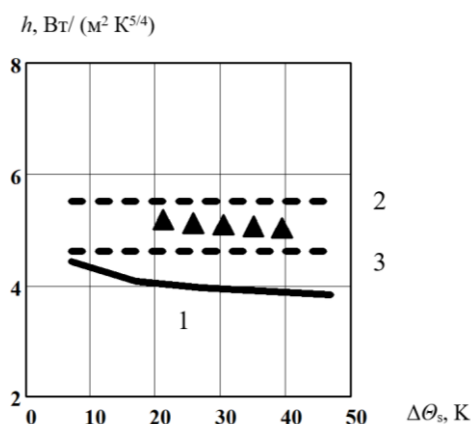


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнту теплового розсіяння h від різниці температур поверхні ЗПЕ-кабелю діаметром 37 мм і оточуючого повітря $\Delta\Theta_s$ (формула (14) трикутні точки) спільно з нормативним рівнянням для стаціонарного теплового режиму в порівнянні з діапазоном можливих значень за стандартом [8] (горизонтальні штрихові лінії 2 і 3); крива 1 за [13] для кабелю діаметром 37 мм різниці температур поверхні кабелю діаметром 37 мм і оточуючого повітря, розрахована за формулою (14) в порівнянні з діапазоном можливих значень за стандартом [8, 13]

Введення аналітичного виразу для коефіцієнту розсіяння тепла з поверхні кабелю у повітрі у систему перевірених досвідом нормативних рівнянь для визначення тривалого струмового навантаження кабелю за заданої граничної температури ізоляції, дає можливість визначення параметрів будь-якого потрібного в експлуатації діапазону тривалих струмових навантажень, менших за гранично допустиме [11].

Використання в моделі теплового балансу формули (14) для коефіцієнту розсіяння тепла як функції спектру теплофізичних параметрів конвективного охолодження і випромінювання нагрітого кабелю, з одного боку, і функції параметрів струмового навантаження кабелю, з іншого, є необхідною складовою моделі для визначення навантажувальної здатності кабелю в реальних стаціонарних режимах експлуатації за заданої граничної температури ізоляції за умовами експлуатації Θ_g [7, 13].

Результати розрахунків тривалого струмового навантаження ЗПЕ-кабелю середньої напруги за заданої граничної температури ізоляції і відповідні теплові параметри кабелю наведено на рис. 2.

Результати, представлені на рис. 2 свідчать, що змінні, які дозволяє визначити запропонована модель, а саме струм тривалого навантаження I , коефіцієнт теплового розсіяння h , різниця температури поверхні кабелю і оточуючого повітря не є незалежними. Другий висновок: залежності теплових параметрів від струмових навантажень є нелінійними: коефіцієнт розсіяння тепла h за фізичною суттю є параметром вимушеним: і конвективна, і випромінювальна його складові зростають при збільшенні струмового навантаження на кабель, але по різному, тому користуватись лише одною формулою (14) для

оцінювання впливу h на струм в стаціонарному теплому режимі є помилкою. Формула (14) дає реальну можливість оцінити коефіцієнт розсіяння тепла h саме як невід'ємну частину моделі теплового балансу для конкретного кабелю [10].

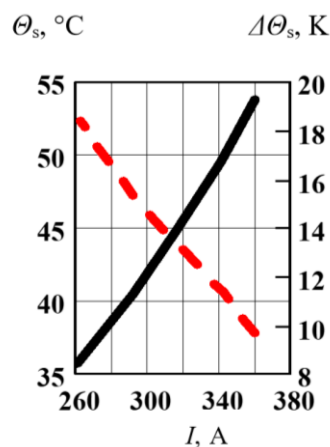


Рисунок 2 – Залежності температури поверхні кабелю Θ_s (штрихова) і різниці температур між поверхнею і віддаленим оточуючим середовищем $\Delta\Theta_s$ (суцільна) від струму тривалого навантаження у повітрі кабелю АПВЄВнг 1×70 на напругу 35 кВ як результати розрахунків за моделлю теплового балансу, що включає формулу (14) для коефіцієнту розсіяння тепла і формулу (15) для оцінки $\Delta\Theta_s$ при заданих значеннях граничної температури ізоляції Θ_g

Менш очевидним і тому головним є висновок, що використання в моделі теплового балансу формули для коефіцієнту розсіяння тепла h (17) як функції спектру теплофізичних параметрів конвективного охолодження і випромінювання нагрітого кабелю, з одного боку, і функції параметрів струмового навантаження кабелю, з іншого, є абсолютно необхідним для визначення навантажувальної здатності кабелю в реальних режимах тривалого струмового навантаження, меншого за гранично допустиме, тобто в режимах реальної експлуатації [10, 13].

Цей висновок підтверджують дані рис. 3, на якому на криві нагрівання кабелю АПВЄВнг 1×70-35 у відкритому повітрі нанесені значення максимальної температури для цього кабелю за різних значень струму навантаження як рішення моделі теплового балансу [7].

Для розрахунку кривих нагрівання на рис. 3 використано відому експоненційну двопараметричну модель [13] з початковими умовами $t = 0$; $\Theta = 0$:

$$\Theta - \Theta_o = (\Theta_g - \Theta_o)(1 - \exp(-\beta / t)), \quad (16)$$

де β – постійна нагрівання: добуток теплоємності кабелю на тепловий опір кабелю $\beta = C_k \cdot S_k$ [11, 13].

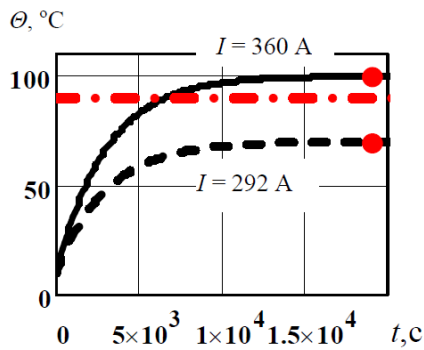


Рисунок 3 – Криві нагрівання кабелю АПВЕВнг 1×70-35 у відкритому повітрі за різних значень струму навантаження: точками нанесені значення максимальної температури як рішення запропонованої моделі теплового балансу; штрих-пунктирною лінією позначено гранично допустиму температуру ізоляції

Достатню для практичних застосувань точність простої експоненційної моделі нагрівання кабелю ілюструє рис.4, на якому представлено експериментальні дані нагрівання кабелю АПВЕВнг 1×70-35 в лінеаризованій системі координат для емпіричної оцінки постійної нагрівання як параметру лінійної функції методом найменших квадратів [16,17,22].

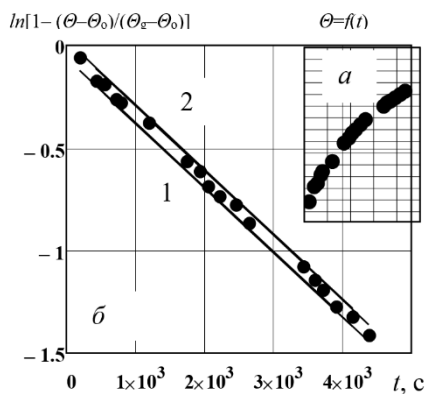


Рисунок 4 – Експериментальні дані нагрівання кабелю АПВЕВнг 1×70-35 в лінеаризованій системі координат

На рис. 4 виміряні значення залежності температури жили від часу нагрівання струмом 400 А у вигляді нелінійної функції $\theta=f(t)$ (а) представлені лінійною функцією $\ln[1 - (\theta - \theta_0) / (\theta_g - \theta_0)] = f(t)$ (б) і методом найменших квадратів визначені оцінки параметрів лінійної функції, зокрема емпірична оцінка сталої нагрівання кабелю $\beta^* = 3174$ с. Визначене розрахунком значення сталої нагрівання як добутку теплоємності кабелю C_k на тепловий опір кабелю S_k за нормальної температури 20 °С: $\beta = C_k \cdot S_k = 4372 \times 0,678 = 2964$ с [7].

В прийнятних для практичних застосувань одиницях виміру годинах одержані оцінки β становлять відповідно 0,88 год і 0,82 год, тобто практично співпадають. На рис.4 б) нанесені верхня і нижня границі, визначені як відхилення $\pm 3\sigma$ від визначеної методом найменших квадратів лінійної

функції, де σ – середньоквадратичне відхилення вимірних значень від цієї функції.

Спільне використання запропонованої моделі теплового балансу і розрахунку кривих нагрівання за відомою експоненційною моделлю (16) [16,22] дає можливість визначення допустимого часу заданого перевантаження для реальних режимів тривалого струмового навантаження, меншого за гранично допустиме, тобто в режимах реальної експлуатації, що ілюструє рис.5.

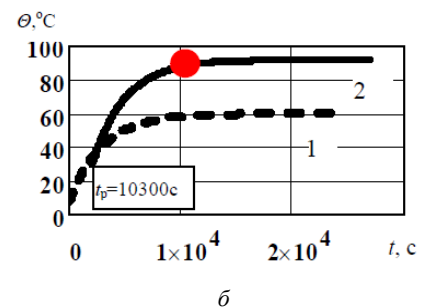
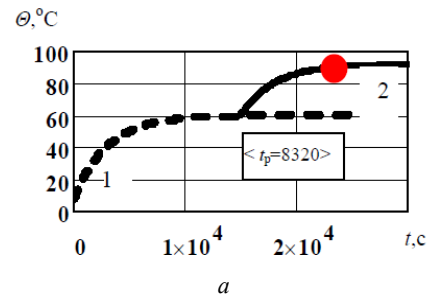


Рисунок 5 – Ілюстрація визначення допустимого часу заданого перевантаження в різні моменти початку перевантаження:

- 1 – нагрівання кабелю від включення на струмове навантаження 75 % від гранично допустимого;
- 2 – нагрівання кабелю при гранично допустимому навантаженні в різні моменти:

- (а) в будь-який момент, коли є стаціонарний тепловий режим при 75 % навантаженні;
- (б) в момент, коли в режимі 75 % навантаження досягнуто температури 40 °С

Зразок використання запропонованої моделі теплового балансу спільно з кривими нагрівання за (16) для конкретного режиму перевантаження конкретного кабелю в конкретних умовах експлуатації наведено на рис. 6.

Подібні номограми можуть бути побудовані для заданого діапазону можливих струмових навантажень, конкретних конструкцій ЗПЕ-кабелів середньої напруги на основі прискорених неруйнівних випробувань на нагрівання в умовах виробництва [5, 7, 13, 15, 18].

Вертикальна штрихова лінія на рис.6 свідчить, що експериментально визначений час нагрівання кабелю до гранично допустимої для ізоляції температури співпадає з допустимим часом перевантаження при включенні струмового навантаження, на 30 % більшого за номінальний струм цього кабелю.

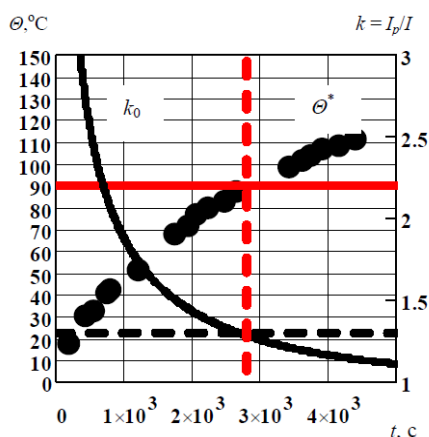


Рисунок 6 – Номограма для визначення параметрів допустимого перевантаження, розроблена на основі запропонованої моделі теплового балансу спільно з кривими нагрівання за відомою експоненційною моделлю (16) для перевантаження $k = I_p/I_n = 1,3$ відносно номінального струму кабелю АПвЕВнг1×70-35 в цеху при $\Theta_0 = 10^\circ\text{C}$:

k_0 – залежність коефіцієнту перевантаження від допустимого часу перевантаження від моменту включення ($t = 0$; $\Theta = \Theta_0$);

Θ^* – виміряна температура жили в момент t

Рисунки 3 і 5 ілюструють можливість побудови подібних номограм для заданого діапазону тривалих струмових навантажень (розрахунок за моделлю і можливих перевантажень за експоненційною моделлю (16). Вихідними даними для такої побудови є:

- конструктивні і технічні параметри ЗПЕ-кабелю середньої напруги;
- експериментально визначена крива нагрівання конкретного кабелю в режимі перевантаження, яке є прискореним випробуванням для перевірки розрахованої сталої нагрівання кабелю і одночасно альтернативним традиційному випробуванню підвищеною постійною напругою, яка не рекомендована для ЗПЕ-кабелів [8, 10].

Висновки.

1. Для ЗПЕ-кабелів, які є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки і які суттєво відрізняються від традиційних маслонаповнених кабелів, характерне підвищене значення допустимої температури і відповідно допустимого струму, що збільшує теплове навантаження на елементи конструкції кабелю і вимагає окремого розгляду можливих теплових перевантажень в експлуатації.

2. Розроблена і перевірена експериментально в умовах виробництва модель визначення діапазону тривалих струмових навантажень, менших гранично допустимого, для конкретного ЗПЕ-кабелю середньої напруги, яка основана на

- універсальному принципі теплового балансу в стаціонарному режимі;
- нормованій формулі для визначення коефіцієнту теплопередачі α з поверхні кабелю як

функції двох параметрів: $\alpha = h \cdot \Delta\Theta_s^m$, де h – коефіцієнт теплового розсіяння з поверхні кабелю в $\text{Вт}/\text{м}^2\text{K}^{5/4}$,

- $\Delta\Theta_s = \Theta_s - \Theta_0$, різниця температур поверхні кабелю і довкілля;

- запропонованій моделі для визначення коефіцієнту теплового розсіяння при конвекції і випромінюванні (14) для горизонтально розташованого окремо прокладеного в повітрі кабелю діаметром d в полімерній зовнішній оболонці.

3. Показана можливість побудови номограм для визначення параметрів допустимих перевантажень ЗПЕ-кабелів середньої напруги в діапазоні тривалих струмових навантажень в експлуатації, які зазвичай суттєво менші гранично допустимих, вихідними даними для яких є:

- конструктивні і технічні параметри конкретного ЗПЕ-кабелю середньої напруги;
- експериментально визначена крива нагрівання цього кабелю в режимі перевантаження відносно номінального струму, яка одночасно є альтернативою традиційному випробуванню підвищеною постійною напругою, яка не рекомендована для високовольтних ЗПЕ-кабелів [8, 10].

Список літератури

1. Furse C. M., Kafal M., Razzaghi R., Shin Y.-J. Fault Diagnosis for Electrical Systems and Power Networks: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, no. 2. P. 888–906. doi: 10.1109/JSEN.2020.2987321.
2. Andritsch T., Vaughan A., Stevens G. C. Novel insulation materials for high voltage cable systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2017. Vol. 33, no. 4. P. 27–33. doi: 10.1109/MEI.2017.7956630.
3. Kafal M., Grégis N., Benoit J., Ravot N., Lagomarsini C., Gobat G. Pilot Tests of FasTR Method for Locating Transient Faults in Medium Voltage Underground Power Networks. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, no. 6. P. 8510–8519. doi: 10.1109/JSEN.2020.3034465.
4. Feng X., Xiong Q., Gattozzi A., Montanari G. C., Seri P., Hebner R. Cable commissioning and diagnostic tests: The effect of voltage supply frequency on partial discharge behaviour. *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. 2018. P. 373–376. doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401066.
5. Montanari G. C., Hebner R., Morshuis P., Seri P. An Approach to Insulation Condition Monitoring and Life Assessment in Emerging Electrical Environments. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019. Vol. 34, no. 4. P. 1357–1364. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2897905.
6. Oluwafemi I., Salau A. O., Laseinde T. Causes of Deterioration in XLPE MV Cables: A Review. *Recent Patents on Engineering*. 2021. Vol. 15, iss. 2. P. 218–224. doi: 10.2174/1872212114666200117110502.
7. Гонтар Ю. Г., Щепенюк Л. А., Антоненко С. Ю. Теплофізичні аспекти визначення навантажувальної здатності силових кабелів середньої напруги з ізоляцією із зшитого поліетилену в стаціонарних режимах експлуатації. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2020. №10 (152). С. 54–64. doi: 10.20998/2313-8890.2020.09.07.
8. IEC 60287-1-1:2006+A1:2014 *Electric cables. Calculation of the current rating. Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses. General*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2014. 136 p.
9. Kucheriava I. M. Electric field enhancement in polyethylene cable insulation with defects. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 11–16. doi: 10.15407/techned2018.02.011.
10. Krbal M., Pelikan L., Bukvisova Z., Kolcunova I. Heating MV Cables to the Exact Temperature for Combined Test. *Przeglad*

- Elektrotechniczny*. 2019. No. 11. P. 193–199. doi: 10.15199/48.2019.11.48.
11. Шебенюк Л. А., Антонець Т. Ю. Дослідження втрат в ізоляції високовольтних силових кабелів з полімерною ізоляцією. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2016. №4. С. 58–62. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.08.
 12. Coughlan A., Kearney J., Looby T. Review of the Effectiveness of Impulse Testing for the Evaluation of Cable Insulation Quality and Recommendations for Quality Testing. *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2018. P. 1–6. doi: 10.1109/UPEC.2018.8541845.
 13. Антонець Т. Ю., Гонтар Ю. Г. Вплив динаміки нагрівання полімерної ізоляції силових кабелів середньої напруги на їх пропускну здатність. *Світлотехніка та Електроенергетика*. 2020. № 3 (59). С. 127–130. doi: 10.33042/2079-424X-2020-3-59-127-130.
 14. Zhuang X., Niu H., Wang J., You Y., Sun G. Experimental Study on the Cyclic Ampacity and Its Factor of 10 kV XLPE Cable. *Energy and Power Engineering*. 2013. Vol. 5, no. 4. P. 1221–1225. doi: 10.4236/epe.2013.54B231.
 15. Jahromi A. N., Pattabi P., Densley J., Lamarre L. Medium voltage XLPE cable condition assessment using frequency domain spectroscopy. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2020. Vol. 36, no. 5. P. 9–18. doi: 10.1109/MEI.2020.9165695.
 16. Sun B. Parameters Calculation of Underground Cables Using MATLAB. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2020. Vol. 8, no. 11. P. 12–20. doi: 10.4236/jpee.2020.811002.
 17. Alamoudi M., Alamoudi R. () Implementing Lean Methodology in a Power Cable Factory: A Case Study of a Low Voltage Cable. *American Journal of Industrial and Business Management*. 2019. Vol. 9, no. 12. P. 2083–2097. doi: 10.4236/ajibm.2019.912138.
 18. Brakelmann H., Anders G. A new method for analyzing complex cable arrangements. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. doi: 10.1109/TPWRD.2021.3094666.
 19. Rerak M., Ocloń P. Thermal analysis of underground power cable system. *Journal of Thermal Science*. 2017. Vol. 26, no. 5. P. 465–471. doi: 10.1007/s11630-017-0963-2
 20. Gontar Yu., Kiessaiev O., Antonets T. Quality control and evaluation of the life cycle insulated power cables XPLE. *The scientific heritage*. 2021. Vol. 1, no. 59. P. 24–26. doi: 10.24412/9215-0365-2021-59-1-24-26.
 21. Беспрозванных А. В., Кессаев А. Г. Технологические и эксплуатационные факторы локального усиления напряженности электрического поля в силовом кабеле коаксиальной конструкции. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 6. С. 54–59. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.09.
 22. Nadeau S. Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma in Higher Education: A Review of Experiences around the World. *American Journal of Industrial and Business Management*. 2017. Vol. 7, no. 5. P. 591–603. doi: 10.4236/ajibm.2017.75044.
- References (transliterated)**
1. Furse C. M., Kafal M., Razzaghi R., Shin Y.-J. Fault Diagnosis for Electrical Systems and Power Networks: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2021, vol. 21, no. 2, pp. 888–906. doi: 10.1109/JSEN.2020.2987321.
 2. Andritsch T., Vaughan A., Stevens G. C. Novel insulation materials for high voltage cable systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2017, vol. 33, no. 4, pp. 27–33. doi: 10.1109/MEI.2017.7956630.
 3. Kafal M., Grégis N., Benoit J., Ravot N., Lagomarsini C., Gobat G. Pilot Tests of FasTR Method for Locating Transient Faults in Medium Voltage Underground Power Networks. *IEEE Sensors Journal*. 2021, vol. 21, no. 6, pp. 8510–8519. doi: 10.1109/JSEN.2020.3034465.
 4. Feng X., Xiong Q., Gattozzi A., Montanari G. C., Seri P., Hebner R. Cable commissioning and diagnostic tests: The effect of voltage supply frequency on partial discharge behaviour. *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. 2018, pp. 373–376. doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401066.
 5. Montanari G. C., Hebner R., Morshuis P., Seri P. An Approach to Insulation Condition Monitoring and Life Assessment in Emerging Electrical Environments. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019, vol. 34, no. 4, pp. 1357–1364. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2897905.
 6. Oluwafemi I., Salau A. O., Laseinde T. Causes of Deterioration in XLPE MV Cables: A Review. *Recent Patents on Engineering*. 2021, vol. 15, iss. 2, pp. 218–224. doi: 10.2174/1872212114666200117110502.
 7. Gontar Yu., Shchebenyuk L., Antonets S. Teplofizychni aspekty vyznachennya navantazhuval'noyi zdatnosti sylovykh kabeliv seredn'oyi napruhy z izolyatsiyeyu iz zshytoho polietylenu v statsionarnykh rezhymakh ekspluatatsiyi [Thermal physical aspects of determination of load capacity medium voltage power cables with cross-polyethylene insulation in stationary operating modes]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*. 2020, no. 10 (152), pp. 54–64. doi: 10.20998/2313-8890.2020.09.07.
 8. IEC 60287-1-1:2006+A1:2014 *Electric cables. Calculation of the current rating. Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses. General*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2014. 136 p.
 9. Kucheriava I. M. Electric field enhancement in polyethylene cable insulation with defects. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018, no. 2, pp. 11–16. doi: 10.15407/technd2018.02.011.
 10. Krbal M., Pelikan L., Bukvisova Z., Kolcunova I. Heating MV Cables to the Exact Temperature for Combined Test. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019, no. 11, pp. 193–199. doi: 10.15199/48.2019.11.48.
 11. Shchebenyuk L. A., Antonets T. Yu. Doslidzhennya vtrata v izolyatsiyi vysokovol'tnykh sylovykh kabeliv z polimernoyu izolyatsiyeyu [Investigation of losses in insulation of high-voltage power cables with XLPE insulation]. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016, no. 4, pp. 58–62. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.08.
 12. Coughlan A., Kearney J., Looby T. Review of the Effectiveness of Impulse Testing for the Evaluation of Cable Insulation Quality and Recommendations for Quality Testing. *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/UPEC.2018.8541845.
 13. Gontar Yu., Antonets T. Vplyv dynamiky nahrivannya polimernoyi izolyatsiyi sylovykh kabeliv seredn'oyi napruhy na yikh propusknu zdattist' [Influence of heating dynamics of polymer insulation of medium voltage power cables on their performance]. *Lighting engineering and power engineering*. 2020. Vol. 3, no. 59, pp. 127–130. doi: 10.33042/2079-424X-2020-3-59-127-130.
 14. Zhuang X., Niu H., Wang J., You Y., Sun G. Experimental Study on the Cyclic Ampacity and Its Factor of 10 kV XLPE Cable. *Energy and Power Engineering*. 2013, vol. 5, no. 4, pp. 1221–1225. doi: 10.4236/epe.2013.54B231.
 15. Jahromi A. N., Pattabi P., Densley J., Lamarre L. Medium voltage XLPE cable condition assessment using frequency domain spectroscopy. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2020, vol. 36, no. 5, pp. 9–18. doi: 10.1109/MEI.2020.9165695.
 16. Sun B. Parameters Calculation of Underground Cables Using MATLAB. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2020, vol. 8, no. 11, pp. 12–20. doi: 10.4236/jpee.2020.811002.
 17. Alamoudi M., Alamoudi R. Implementing Lean Methodology in a Power Cable Factory: A Case Study of a Low Voltage Cable. *American Journal of Industrial and Business Management*. 2019, vol. 9, no. 12, pp. 2083–2097. doi: 10.4236/ajibm.2019.912138.
 18. Brakelmann H., Anders G. A new method for analyzing complex cable arrangements. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. doi: 10.1109/TPWRD.2021.3094666.
 19. Rerak M., Ocloń P. Thermal analysis of underground power cable system. *Journal of Thermal Science*. 2017, vol. 26, no. 5, pp. 465–471. doi: 10.1007/s11630-017-0963-2
 20. Gontar Yu., Kiessaiev O., Antonets T. Quality control and evaluation of the life cycle insulated power cables XPLE. *The scientific heritage*. 2021, vol. 1, no. 59, pp. 24–26. doi: 10.24412/9215-0365-2021-59-1-24-26.
 21. Bezprozvannykh G. V., Kyessayev A. G. Tekhnologicheskie i ekspluatatsionnye faktory lokal'nogo usileniya napryazhennosti elektricheskogo polya v silovom kabele koaksial'noy konstruktzii [The technological and exploitative factors of local increase of electric field strength in the power cable of coaxial design]. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016, no. 6, pp. 54–59. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.09.
 22. Nadeau S. Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma in Higher Education: A Review of Experiences around the World. *American Journal of Industrial and Business Management*. 2017, vol. 7, no. 5, pp. 591–603. doi: 10.4236/ajibm.2017.75044.

Надійшло (received) 18.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Золотарьов Володимир Михайлович (Золотарев Владимир Михайлович, Volodymyr Zolotarov) – доктор технічних наук, професор, генеральний директор ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

Антонець Станіслав Юрійович (Антонец Станислав Юрьевич, Stanislav Antonets) – кандидат технічних наук, начальник управління зовнішньоекономічних зв'язків ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; e-mail: antonets.uves@yuzhcable.com.ua.

Обозний Андрій Леонідович (Обозный Андрей Леонидович, Andrii Oboznyi) – головний технолог ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

Антонець Юрій Опанасович (Антонец Юрий Афанасьевич, Yurii Antonets) – кандидат технічних наук, технічний директор ПАТ «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, Україна; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

Гонтар Юлія Григорівна (Гонтарь Юлия Григорьевна, Yuliya Gontar) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4433-7305>, e-mail: Yuliia.Gontar@khp.edu.ua.

Щебенюк Леся Артемівна (Щебенюк Леся Артемовна, Lesia Shchebeniuk) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків, Україна; e-mail: Lesia.Shchebeniuk@khp.edu.ua.

Кессаєв Олександр Геннадійович (Кессаев Александр Геннадьевич, Oleksandr Kiessaiev) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5601-5955>, e-mail: Kiessaiev.Oleksandr@khp.edu.ua.