

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-10>

УДК 621.315.23:62-97

І. М. Трунова¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7510-4291

А. І. Середа¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7670-6822

О. А. Савченко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6401-0852

С. В. Галько², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

С. А. Попадченко¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0003-2537-9769

¹Державний біотехнологічний університет, м. Харків²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

email: trunova_iryna@btu.kharkov.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ЖИЛИ КАБЕЛЮ

Анотація. Частка кабельних ліній в Україні має тенденцію до збільшення по відношенню до повітряних ліній, у тому числі внаслідок прагнення захистити електромережі від наслідків ракетних обстрілів. При цьому існують певні чинники, які впливають на їхню надійність. Експлуатаційна надійність кабельних ліній закладається ще на етапі проектування та виробництва. Будь-яка ізоляція в процесі експлуатації має тепловий знос, що й зумовлює, як правило, певний строк служби таких ліній. У статті визначено впливові експлуатаційні чинники зміни температури жили кабелю. Запропоновано рекомендації щодо використання комп'ютерних технологій для дослідження в експлуатаційних умовах узагальненої математичної моделі зміни температури жили кабелю з метою подальшого коригування тривало допустимих струмових навантажень (або застосування інших заходів для зменшення нагріву кабелю).

Ключові слова: кабельна лінія, температура жили, тривало допустиме навантаження, експлуатаційні умови, комп'ютерні технології.

Постановка проблеми. У сучасних системах електропостачання використовуються повітряні (ПЛ) та кабельні (КЛ) лінії електропередач, які найбільш розповсюджені у країнах ЄС, при цьому їхня частка в електромережах напругою до 100 кВ включно за даними [1] становить 50% від довжини ПЛ. Частка КЛ в Україні має також тенденцію до збільшення по відношенню до ПЛ, у тому числі внаслідок прагнення захистити електромережі від наслідків ракетних обстрілів. При цьому існують певні чинники, які впливають на надійність КЛ. Експлуатаційна надійність КЛ закладається ще на етапі проектування та виробництва. Наприклад, розробки нових видів ізоляційного покриття, зокрема кабелів із ізоляцією зі зшитого поліетилену, рекомендують до використання завдяки низьким діелектричним втратам, великій пропускній здатності, високій стійкості у разі короткого замикання, відповідно, надійності в експлуатації, стійкості до пошкоджень, менших витрат на реконструкцію. Однак будь-яка ізоляція в процесі експлуатації має тепловий знос, що й зумовлює, як правило, певний строк служби КЛ. Під час експлуатації для підвищення надійності КЛ контролюють температуру жили кабелю, виконуючи певні виміри, розрахунки та порівняння їхніх результатів із нормами, та приймають відповідні технічні заходи у разі необхідності. Тому питання дослідження математичної моделі зміни температури жили кабелю, зокрема з використанням комп'ютерних технологій, є актуальним.

Аналіз останніх досліджень. Технічний стан електроенергетичного обладнання є основою надійного електропостачання споживачів [2–4]. При цьому забезпечення справного технічного стану ізоляції – одне з головних завдань експлуатаційного персоналу, відповідно до вимог нор-

мативних документів, зокрема [5–7], встановлено гранично допустимі температури нагріву (трансформаторної оливи, електродвигунів, проводів ПЛ тощо). І хоча в багатьох дослідженнях [8–10] зроблено висновок про більшу надійність КЛ порівняно з ПЛ, але проблема дотримання певних температурних режимів КЛ також є. У стандарті [11] наведено алгоритм визначення температури жили кабелю залежно від багатьох експлуатаційних чинників, таких як робочий струм, питомий тепловий опір ґрунту, виміряна температура безпосередньо на бронестрічці (оболонці або шланзі) кабелів тощо. Відповідно, для прийняття заходів із покращення температурного режиму КЛ необхідне використання цього алгоритму з багатьма ітераціями, наприклад досліджуючи, як вплине зміна ґрунту з кращими показниками теплопровідності на ділянці КЛ, де ґрунт має ці показники дуже низькі, або як вплине зміна навантаження тощо [22–24]. Питанням застосування комп'ютерних технологій в організації експлуатації та дослідженням технічного стану електроенергетичного обладнання присвячено багато статей, зокрема [12; 13; 25], де робиться висновок про доцільність використання комп'ютерних технологій для реалізації складних алгоритмів розрахунків, для обробки великих масивів даних, для вибору довідникових даних. У [14; 26; 27] згадувалася розроблена комп'ютерна програма, яка дала змогу автоматизувати процес урахування багатьох чинників для визначення температури жили кабелю та порівняння її з допустимими значеннями, але не приведено математичну модель, яка досліджується за допомогою вказаної комп'ютерної програми, та не приведено пояснення багатьох можливостей цієї програми.

Формулювання мети статті. Розроблення рекомендацій щодо застосування комп'ютерних технологій для дослідження розробленої математичної моделі зміни температури жили кабелю залежно від впливових експлуатаційних чинників.

Основна частина. Насамперед, надійність КЛ забезпечується дотриманням режимів використання, своєчасними роботами технічної експлуатації, випробуваннями КЛ та вимірюваннями необхідних параметрів [28; 29]. Наприклад, розглянемо такий захід, як дотримання допустимих навантажень, що зумовлено необхідністю недопущення перевищення певних температурних режимів задля забезпечення тривалого строку служби ізоляції кабелю. Згідно зі стандартом [11], існують рекомендації щодо коригування цього параметру (тривало допустимих струмових навантажень) унаслідок того, що розрахункові умови можуть відрізнятися від фактичних.

Однак спочатку слід зауважити, що існує багато параметрів для визначення тривало допустимих навантажень навіть за розрахункових умов [15; 16], таких як прокладання одного кабелю в траншеї на глибині 0,7–1 м за температури ґрунту 15°C і питомого теплового опору $120^{\circ}\text{C}\cdot(\text{см}/\text{Вт})$. Щоб скористатися таблицями стандарту [11] для вибору цього експлуатаційного параметру (тривало допустимого струмового навантаження, що визначено за розрахункових умов), необхідна така інформація:

- матеріал жили (мідь, алюміній);
- вид ізоляції (паперова просочена, збідніло-просочена ізоляція в спільній свинцевій або алюмінієвій оболонці, окремо освинцьована мідними та алюмінієвими жилами зі збідніло-просоченою ізоляцією, окремо освинцьована мідними та алюмінієвими жилами з паперовою просоченою ізоляцією, пластмасова ізоляція тощо);
- середовище, де прокладається кабель (ґрунт, вода, повітря);
- переріз жили (6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240 мм^2);
- кількість жил у кабелі (1, 2, 3, 4);
- напруга (до 1, до 3, 6, 10, 20, 35 кВ).

Вибране розрахункове значення тривало допустимого навантаження кабелю за цими вихідними даними підлягає сезонному коригуванню внаслідок того, що температура навко-

лишнього середовища відрізняється від розрахункової (за сезонного коригування враховують липневу температуру та грудневу і використовують певні коефіцієнти в розрахунку навантаження) [30; 31]. Також використовують певні коефіцієнти, що враховують кількість поруч прокладених кабелів у землі та фактичний тепловий опір ґрунту, який визначають для ділянки з найгіршими умовами охолодження [17; 18; 32]. Умови охолодження кабелів погіршуються у разі їх прокладання в трубах довжиною понад 10 м під землею (також у цьому разі іпадку слід зменшувати розрахункове навантаження, використовуючи певний коефіцієнт) [33–35].

Розглянемо приклад розрахунку тривалого допустимого навантаження для кабелю з просоченою паперовою ізоляцією на номінальну напругу 10 кВ із мідними жилами, що прокладений у землі. Приймаємо інші вихідні дані для розрахунку:

- переріз жили – 50 мм²;
- кількість жил – 3;
- кабель прокладений у Харківській області;
- у траншеї прокладено паралельно три однакові кабелі з відстанню у світлі 200 мм;
- питомий тепловий опір ґрунту – 150°C·(см/Вт).

Загальний порядок дій розрахунку тривалого допустимого навантаження кабелю такий:

1) визначаємо за даними табл. 3 [11] тривало допустиму температуру нагріву жили цього кабелю 60°C;

2) згідно з табл. А.1.1 [11], тривало допустимі струмові навантаження, що визначені для номінальних умов температури ґрунту 15°C та питомого теплового опору ґрунту 120°C·(см/Вт), становлять $I_{ном}=180$ А;

3) визначаємо за табл. 6 [11], що Харківська область – це Північний регіон із середньою температурою ґрунту влітку 20°C, в осінньо-зимовий сезон – 10°C, тобто поправочний коефіцієнт за табл. Б.2 [11] має бути:

- для літнього сезону – $k_1=0,94$;
- для зимового сезону – $k_1=1,06$;

4) згідно з табл. Б.1 [11], поправочний коефіцієнт на кількість прокладених кабелів в одній траншеї – $k_2=0,87$;

5) згідно з табл. В.2 [11], поправочний коефіцієнт залежно від питомого теплового опору ґрунту – $k_3=0,93$;

6) відповідно, загальний вираз для визначення тривало допустимого струмового навантаження за таких умов

$$I_{дон} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot I_{ном}, \quad (1)$$

звідси

- для літнього періоду:

$$I_{дон} = 0,94 \cdot 0,87 \cdot 0,93 \cdot 180 = 137 \text{ А};$$

- для зимового періоду:

$$I_{дон} = 1,06 \cdot 0,87 \cdot 0,93 \cdot 180 = 154 \text{ А}.$$

Відповідно, використання комп'ютерних технологій буде значно полегшувати і вибір необхідних табличних даних (за умови їх завантаження, наприклад, в електронні таблиці Microsoft Excel) [36–38], і подальший розрахунок коригованого тривало допустимого струмового навантаження залежно від змін впливових чинників.

Коли в процесі експлуатації КЛ виникає необхідність контролювати дійсну температуру нагріву жили кабелю, то це робиться вимірюванням безпосередньо температури на броне-

стрічці (оболонці або шланзі) кабелів [39–41], а потім визначають температуру жили кабелю за певним алгоритмом, де враховуються багато чинників [19–21].

Узагальнена математична модель для дослідження в експлуатаційних умовах зміни температури жили кабелю з метою подальшого коригування тривало допустимих струмових навантажень (або застосування інших заходів для зменшення нагріву кабелю) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_{жс} &= f(\vartheta_{бр}, I_{досл}, n, \rho_{20}, T_k, K_p, S, \alpha, \vartheta_{дон}, \vartheta_{нс}), \\ \vartheta_{жс} &< \vartheta_{дон}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $\vartheta_{бр}$ – температура бронестрічки (оболонки) кабелю, що виміряна, °C;

$I_{досл}$ – тривале максимальне навантаження кабелю, що виміряне, А;

n – кількість жил кабелю;

ρ_{20} – питомий електричний опір жили кабелю, Ом·мм²/см;

T_k – сума теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю, °C·(см/Вт);

S – переріз жили кабелю, мм²;

K_p – поправочний коефіцієнт для приведення електричного опору до розрахункової температури (у разі прокладки у повітрі – 1,02; у землі – 0,98);

α – температурний коефіцієнт опору струмовідної жили, °C⁻¹;

$\vartheta_{дон}$ – тривало допустима температура нагрівання жил, °C;

$\vartheta_{нс}$ – температура навколишнього середовища, що виміряна, °C.

Для дослідження математичної моделі (2) була розроблена комп'ютерна програма в електронних таблицях Microsoft Excel. Для ілюстрації використовувалися вихідні дані, що приведені вище і показані на рис. 1.

C18		f _x =C16+C17								
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
Умовне позначення	Показник	Значення								
6										
7	<i>I_m</i>	тривале максимальне навантаження кабелю, що виміряне, А	154							
8	<i>n</i>	кількість жил кабелю	3							
		питомий електричний опір жили кабелю, Ом·мм ² /см (для міді								
9	<i>ρ</i>	17,93·10 ⁻³ ; для алюмінію – 29,4·10 ⁻³)	0,0001793							
10	<i>T_k</i>	сума теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю, °С·(см/Вт)	91							
	<i>S</i>	переріз жили кабелю, мм ²	50							
		поправочний коефіцієнт для приведення електричного опору до розрахункової температури (у разі прокладки у повітрі – 1,02; у землі – 0,98)	0,98							
12	<i>K_p</i>	температурний коефіцієнт опору струмовідної жили, °С ⁻¹ (для міді 0,0039; для алюмінію 0,0040)	0,0039							
13	<i>α</i>									
14	<i>θ_{дон}</i>	тривало допустима температура нагрівання жил, °С	60							
15	<i>θ_{навк.сеп.}</i>	температура навколишнього середовища, що виміряна під час дослідів, °С	27							
16	<i>θ_{бр}</i>	виміряна температура на бронестрічці (оболонці або шланзі) кабеля, °С	33							
17	<i>Δθ</i>	різниця температури між бронестрічкою (оболонкою або шлангом) кабелю і жилами кабелю, °С	25,68							
18	<i>θ_{жс}</i>	температура жили кабелю, °С	58,68							

$$\Delta \vartheta = \frac{I_{доп}^2 \cdot n \cdot \rho_{20} \cdot T_k \cdot K_p}{S} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_{дон} - \vartheta_{навк.сеп.})]$$
$$\vartheta_{жс} = \vartheta_{бр} + \Delta \vartheta$$

Рис. 1. Скріншот із вихідними даними та результатами розрахунків під час визначення температури жили кабелю

Окрім того, на рис. 1 показано результат розрахунку спочатку різниці температури між бронестрічкою (оболонкою або шлангом) кабелю і жилами кабелю в осередку C17 за аналітичною формулою, що показана правіше, а в осередку C18 – кінцевий результат розрахунку температури жили кабелю.

На прикладі визначення суми теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю T_k (°C·(см/Вт)) проілюструємо можливість застосування електронних таблиць для використання довідникових даних стандарту [11]. Для цього була попередньо занесена інформація табл. К.1 з [11] до

електронних таблиць Microsoft Excel. На рис. 1 в осередку C10 показано результат розрахунку суми теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю, а фрагмент комп'ютерної програми з логічною функцією вибору потрібних довідникових даних «ЕСЛИ» показано на рис. 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
10	<i>T_k</i>	сума теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю, °C·(см/Вт)	=ЕСЛИ(C11=C23;(C28+C29);ЕСЛИ(C11=D23;(D28+D29);ЕСЛИ(C11=E23;(E28+E29);ЕСЛИ(C11=F23;(F28+F29);ЕСЛИ(C11=H23;(H28+H29);ЕСЛИ(C11=I23;(I28+I29);ЕСЛИ(C11=J23;(J28+J29);ЕСЛИ(C11=K23;(K28+K29);(L28+L29))))))))))									
20												
21												
22	Напруга кабелю, кВ	Шар	Теплові опори ізоляції кабелів з перерізом жили, мм ²									
23			16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
28	10	Ізоляція	101	89	82	72	66	57	51	47	43	37
29		Зовнішні покриви	25	24	20	19	18	18	17	17	15	15

Рис. 2. Фрагмент комп'ютерної програми з логічною функцією вибору потрібних довідникових даних «ЯКЩО»

Під час вимірів температури на оболонці кабелю дуже зручно використовувати цю комп'ютерну програму для точних та швидких розрахунків, навіть у польових умовах, із використанням смартфона, завантаживши файл із програмою. На рис. 3 показано скріншот екрану смартфона з результатом розрахунку. У режимі «Правка» можна змінювати результати вимірів тривалого максимального навантаження кабелів, температури навколишнього середовища та температури на бронестрічці (оболонці або шланзі) кабелю і, таким чином, отримувати негайно результати вимірювань. Також можна коригувати інші вихідні дані, наприклад кількість жил кабелю, поправочний коефіцієнт для приведення електричного опору до розрахункової температури (у програмі використовувався коефіцієнт для кабелів, що прокладені у ґрунті), температурний коефіцієнт опору струмовідної жили (у програмі використовувався коефіцієнт для міді), питомий електричний опір жили кабелю (у програмі використовувався коефіцієнт для міді), тривало допустима температура нагрівання жил (хоча для цього параметру можна також застосувати логічну функцію «ЕСЛИ» для вибору табличних даних, попередньо завантаживши їх до електронних таблиць).

Лист1	Лист2	Лист3	...
7	тривале максимальне навантаження кабелю, що виміряне, А	154	
8	кількість жил кабелю	3	
9	питомий електричний опір жили кабелю, Ом·мм ² /см (для міді 17,93·10 ⁻⁵ ; для алюмінію – 29,4·10 ⁻⁵)	0,0001793	
10	сума теплових опорів ізоляції і захисних покривів кабелю, °C·(см/Вт)	91	
11	переріз жили кабелю, мм ²	50	
12	поправочний коефіцієнт для приведення електричного опору до розрахункової температури (у разі прокладки у ґрунті)	0,98	
13	температурний коефіцієнт опору струмовідної жили, °C ⁻¹ (для міді 0,0039; для алюмінію 0,0040)	0,0039	
14	тривало допустима температура нагрівання жил, °C	60	
15	температура навколишнього середовища, що виміряна під час дослідів, °C	27	
16	виміряна температура на бронестрічці (оболонці або шланзі) кабелю, °C	33	
17	різниця температури між бронестрічкою (оболонкою або шлангом) кабелю і жилами кабелю, °C	25,68	
18	температура жили кабелю, °C	58,68	

Рис. 3. Скріншот екрану смартфона з комп'ютерною програмою розрахунку в електронних таблицях Microsoft Excel температури жили кабелю під час вимірювань

Також для зручності в електронних таблицях Microsoft Excel можна запрограмувати зміну кольору клітинки з результатом розрахунку (якщо розрахункова температури жили кабелю перевищує максимально допустиму). Для цього використовується функція «Умове форматування» (Conditional formatting) з опцією «Формат користувача».

Висновки. Приведені рекомендації щодо використання комп'ютерних технологій для дослідження в експлуатаційних умовах узагальненої математичної моделі зміни температури жили кабелю значно зменшать трудомісткість розрахунків та дадуть змогу оперативно коригувати струмові навантаження (або застосовувати інші заходи для зменшення нагріву кабелю).

Список використаних джерел

1. Kalt G., Thunshirn P., Haberla H. A global inventory of electricity infrastructures from 1980 to 2017: Country-level data on power plants, grids and transformers. [Electronic Resource]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8441158/> (accessed on 17.04.2025). <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107351>
2. Pazyi V., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Savchenko O., Halko S. Analysis of Technical Condition Diagnostics Problems and Monitoring of Distribution Electrical Network Modes from Smart Grid Platform Position. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2020. 57–60. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250080>
3. Al Issa H.A. Databases Case Study in Substantiation of Reconstruction of Power Distribution Networks Objects. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine. 2021. 1–6, <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598684>
4. Trunova I., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Pazyi V., Sereda A., Halko S., Buinyi R. The substantiation of reconstruction of power distribution networks objects. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 126–131. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570107>
5. Правила улаштування електроустановок. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
6. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Харків : Форт, 2017. 376 с.
7. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020. Київ : ПАТ «НЕК «Укренерго», 2020. 243 с.
8. Berdishev A., Taslimov A., Melikuziev B., Bijanov A. Reliability indicators of 10 kV cable lines in rural areas. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 869 (July 2020). 022005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/2/022005>
9. L̆vovs A., Friedite I. Reliability cost/worth assessment of distribution network formed by underground cables and overhead lines. *Case study of Latvia. ENERGETIKA*. 2015. T. 61. Nr. 1. 1–11. <https://doi.org/10.6001/energetika.v61i1.3091>
10. Zviedritis M., Gavrilovs A., Kutjuns A. Power supply reliability vs. profitability in rural distribution networks. *Proceedings of Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, Rakvere, 11–13 June 2014. 335–340. <https://doi.org/10.1109/PQ.2014.6866836>
11. Експлуатація силових кабельних ліній напругою до 35 кВ. Інструкція: СОУ-Н МПЕ 40.1.20.509:2005. Київ : ГРІФРЕ, 2005. 125 с.
12. Бондаренко А.В., Трунова І.М. Цифровізація обліку технічного стану повітряних ліній електропередачі. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СУЧАСНОМУ СВІТІ»*, 2024. URL: <https://biotechuniv.edu.ua/nauka/konferentsiyi/> (дата звернення: 22.04.2024).
13. Трунова І.М., Пазій В.Г., Лотоцький Я.В. Аналіз використання комп'ютеризованих систем керування технічним сервісом електрообладнання АПК. *Зб. наук. праць VI Міжнародної науково-технічної конференції «Електроенергетика, електромеханіка та технології АПК»*. Харків : ДБТУ, 2023. 39–40.
14. Мартишко А.С., Трунова І.М. Експлуатаційні дослідження температури нагріву жили кабелю. *Матеріали XIX Міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті»*, 2023. URL: <https://btu.kharkov.ua/novini/mizhnarodnyj-forum-molodi-molod-i-industriya-4-0-v-xxi-storichchi/> (дата звернення: 17.04.2025).

15. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. 415–423. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43
16. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskiy O., Buinyi R., Halko S. Improving the efficiency of solar power plants based on forecasting the intensity of solar radiation using artificial neural networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 137–140. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>
17. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. 4. 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
18. Trunova I. The Motivational Model for Improvement of Electricity Supply Continuity in Post-War Ukraine. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2023. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312937>
19. Типові технологічні карти на капітальний ремонт та технічне обслуговування електричних мереж напругою 0,4-20 кВ: СОУ-Н МПЕ 40.1.20.663:2005. Київ : М-во палива та енергетики України, 2005. 167 с.
20. Визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередач: СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-82:2013. Київ : М-во палива та енергетики України, 2013. 61 с.
21. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги живлення в електричних мережах загального призначення. Замість ДСТУ EN 20160:2010; вхідні дані 20.05.2014. Київ : Міністерство економічного розвитку України. 2014. 32 с.
22. Assad U., Hassan M.A.S., Farooq U., Kabir A., Khan M.Z., Bukhari S.S.H, Jaffri Z.A., Oláh J., Popp J. Smart grid, Demand Response and Optimization: A Critical Review of Computational Methods. *Energies*. 2022. 15. 2003. <https://doi.org/10.3390/en15062003>
23. Perninge M., Soder L. A Stochastic Control Approach to Manage Operational Risk in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2012. 27(2). 1021–1031. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2174165>
24. Al-Quraan T.M.A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko, V., Zayed N.M., Islam A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. 7(4). 92. <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>
25. Samadi P. Advanced Demand Side Management for the Future Smart Grid Using Mechanism Design. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. 3. 1170–1180. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2203341>
26. Al-Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. 12(3). 2323–2334. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>
27. Suslov K., Solonina N., Gerasimov D. Assessment of an impact of power supply participants on power quality. *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Ljubljana, Slovenia. 2018. 1m5. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378836>
28. Miroshnuk O.O., Tymchuk S.O. Uniform distribution of loads in the electric system 0.38/0.22 kV using genetic algorithms. *Technical Electrodynamics*. 2013. 4. 67m73. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885913005&partnerID=MN8TOARS>
29. Tymchuk S., Shendryk S., Shendryk V., Panov A., Kazlauskaitė A., Levytska T. Decision-Making Model at the Management of Hybrid Power Grid. In: Lopata A., Butkienė R., Gudonienė D., Sukackė V. (eds) *Information and Software Technologies. ICIST 2020. Communications in Computer and Information Science*. 2020. 1283. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7_6
30. Lezhenkin O., Halko S., Miroshnyk O., Vershkov O., Lezhenkin I., Suprun O., Shchur T., Kruszelnicka W., Kasner R. Investigation of the separation of combed heap of winter wheat. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1781. 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012016>
31. Verrelli C.M., Tomei P. Adaptive learning control for nonlinear systems: A single learning estimation scheme is enough. *Automatica*. 2023. 149. 110833.
32. Castro J.R., Saad M., Lefebvre S., Asber D., Lenoiret L. Coordinated Voltage Control in Distribution Network with the Presence of DGs and Variable Loads Using Pareto and Fuzzy Logic. *Energies*. 2016. 9. 107. <https://doi.org/10.3390/en9020107>

33. Al_Issa, H.A., Qawaqzeh M., Khasawneh A., Buinyi R., Bezruchko V., Miroshnyk O. Correct Cross-Section of Cable Screen in a Medium Voltage Collector Network with Isolated Neutral of a Wind Power Plant. *Energies*. 2021. 14. 3026. <https://doi.org/10.3390/en14113026>
34. Панов А.О. Розробка алгоритму регулювання сталого відхилення напруги в розподільчих мережах 0,4-10 кВ. *Всеукр. наук.-практ. конф. випускників вищих навчальних закладів та молодих вчених*. Харків : ХНАДУ. 2021. 170–174.
35. Панов А.О., Тимчук С.О. Модель регулювання показників якості електроенергії в розподільчих мережах 0,4–10 кВ. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 2. С. 13–23. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2023.275897>
36. Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Moroz O. The perfection of motivational model for improvement of power supply quality with using the one-way analysis of variance. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. 6. 163–168. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/24>
37. Bazaluk O., Struchaiev N., Halko S., Miroshnyk O., Bondarenko L., Karaiev O., Nitsenko V. Ways to improve the efficiency of devices for freezing of small products. *Materials*. 2022. 15(7). 2412. <https://doi.org/10.3390/ma15072412>
38. Khasawneh A., Qawaqzeh M., Kuchanskyy V., Rubanenko O., Miroshnyk O., Shchur T., Drechny M. Optimal Determination Method of the Transposition Steps of an Extra-High Voltage Power Transmission Line. *Energies*. 2021. 14(20). 6791. <https://doi.org/10.3390/en14206791>
39. Tabor S., Lezhenkin A., Halko S., Miroshnik A., Kovalyshyn S., Vershkov A., Hryhorenko O. Mathematical simulation of separating work tool technological process. *E3S Web of Conferences*. 2019. 132. 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913201025>
40. Wu J., Cui P. Cooperative Adaptive Fuzzy Control for the Synchronization of Nonlinear Multi-Agent Systems under Input Saturation. *Mathematics*. 12(10). (2024). 1426. <https://doi.org/10.3390/math12101426>
41. Chen C.L.P., Ren C.E., Du T. Fuzzy observed-based adaptive consensus tracking control for second-order multiagent systems with heterogeneous nonlinear dynamics. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2015. 24. 906–915.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2025

I. Trunova¹, A. Sereda¹, O. Savchenko¹, S. Halko², S. Popadchenko¹

¹State Biotechnological University

²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

RESEARCH OF A MATHEMATICAL MODEL OF TEMPERATURE CHANGE IN THE CORE OF CABLE

Summary

The share of cable lines in Ukraine tends to increase in relation to overhead lines, including due to the desire to protect power grids from the consequences of missile attacks. At the same time, there are certain factors that affect their reliability. The operational reliability of cable lines is laid down at the design and production stage. Any insulation during operation has thermal wear, which causes, as a rule, a certain service life of such lines. During operation, to increase the reliability of cable lines, the temperature of the cable core is controlled, performing certain measurements, calculations and comparison of their results with the standards, and appropriate technical measures are taken if necessary. The article identifies the influential operational factors of changes in the temperature of the cable core.

An example of calculating the long-term permissible load for a cable with impregnated paper insulation for a rated voltage of 10 kV with copper conductors, which is laid in the ground, is considered. Recommendations for the use of computer technologies for the study of a generalized mathematical model of changes in the temperature of the cable core in operational conditions are proposed for the purpose of subsequent adjustment of long-term permissible current loads (or the use of other measures to reduce cable heating). For its study, a computer program in Microsoft Excel spreadsheets has been developed, which is convenient to use for accurate and fast calculations, even in the field using a smartphone, by downloading a file with the program.



Using a computer program, the result of calculating the temperature difference between the armored tape (sheath or hose) of the cable and the cable cores is given. On the example of determining the sum of thermal resistances of insulation and protective covers of the cable, the possibility of using spreadsheets for the use of reference data of the standard is illustrated.

Keywords: cable line, temperature, long-term permissible load, operational, computer technology.