

## ОЦІНКА ТЕМПЕРАТУРИ НАГРІВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ПРОВІДНИКІВ СИСТЕМ БЛИСКАВКОЗАХИСТУ

В статті описано можливі негативні наслідки, які виникають внаслідок нагрівання струмом блискавки провідників систем блискавкозахисту. Внаслідок складності експериментальних досліджень температур нагрівання в реальних умовах, найдоцільніше їх проводити методами математичного моделювання. Сформовані математичні моделі для оцінки кінцевих температур та перебігу процесів нагрівання провідників систем блискавкозахисту струмом блискавки дозволяють з високою точністю досліджувати процеси нагрівання провідників імпульсами струмів блискавки стандартизованої форми та реальними імпульсами, отриманими шляхом осцилографування. Результати розрахунків порівнювались із даними, наведеними у міжнародному стандарті і підтвердили їх достатню збіжність.

**Ключові слова:** блискавкозахист, математичні моделі, струм блискавки, нагрівання провідників

**Вступ.** Розряди блискавки завжди були і залишаються небезпечними для тих об'єктів, на які вони відбуваються. Внаслідок протікання термічних процесів дуже часто блискавка спричиняє загорання будівель і споруд, наносячи значних матеріальних збитків, а часами призводить до загибелі людей і тварин.

Для захисту об'єктів від ударів блискавки влаштовують системи блискавкозахисту, які призначені для перехоплення і безпечного відведення в землю струму блискавки. Протікаючи по провідниках систем блискавкозахисту струм блискавки викликає їх нагрівання. Правильне проектування і монтаж систем блискавкозахисту неможливе без оцінки температури нагрівання провідників систем блискавкозахисту струмом блискавки.

**Постановка задачі.** Під час проектування систем блискавкозахисту часто необхідно проводити оцінку температури, до якої нагріваються струмом блискавки провідники систем блискавкозахисту, оскільки на сучасному етапі в будівництві застосовують нові будівельні матеріали, котрі можуть пошкоджуватись чи загорятись від нагрітих до високої температури провідників.

В міжнародному стандарті та науковій літературі наведено кілька підходів до оцінки температури нагріву провідників систем блискавкозахисту, які характеризуються невисокою точністю, що призводить до недооцінки температурних режимів провідників систем блискавкозахисту [1, 2, 3].

Через складність виконання в реальних умовах експериментальних досліджень для вимірювання температури нагріву, найдоцільніше таку оцінку здійснювати методами математичного моделювання на основі фундаментальних законів електро- і теплотехніки. В цьому випадку важливо з використанням цих досліджень процесів грозорозрядів на наземні об'єкти сформулювати адекватну математичну модель, яка дозволить проводити необхідну оцінку температури нагрівання струмом блискавки провідників, які використовуються під час улаштування систем блискавкозахисту.

**Розв'язання задачі.** Від величини і тривалості струму блискавки, що протікає по провіднику та від електротеплових характеристик матеріалу провідника залежить температура, до якої він нагріється.

Щоб створити математичну модель для розрахунку температури нагрівання провідників систем блискавкозахисту струмом блискавки приймаємо допущення, що нагрівання провідника відбувається струмом, що рівномірно розподіляється по всьому поперечному перерізу провідника, матеріал провідника є ізотропним, тобто володіє у всіх точках однаковими

електричними властивостями і тепловими характеристиками, опір провідника представляється у вигляді зосереджених величин, що дозволяє описувати процеси системою диференціальних рівнянь із зосередженими параметрами. Під час моделювання процесів нагрівання провідників необхідно також врахувати зміну омичного опору залежно від температури.

Враховуючи короткочасність процесів грозорозрядів вважаємо, що процес є адіабатичним, нехтуючи тепловідведенням від нагрітого провідника, оскільки для практичних цілей дуже важливим є оцінка граничного значення температури, до якої може нагрітися провідник.

За таких умов вся електрична енергія витрачається на нагрівання провідника до певної температури і з врахуванням швидкого нагріву провідників струмом блискавки, рівняння теплового балансу такого провідника запишеться у вигляді:

$$R \cdot i(t)^2 dt = mcd\theta, \quad (1)$$

де  $i(t)$  – миттєве значення струму блискавки, який протікає у провіднику, А;

$R$  – опір провідника, Ом;

$m$  – маса матеріалу провідника, кг;

$c$  – теплоємність матеріалу провідника, Дж/(кг·К);

$dt$  – інтервал часу протікання струму, с;

$d\theta$  – приріст температури провідника, °С.

Після підстановки в рівняння (1) питомих величин матеріалу провідника, врахувавши зміну опору провідника залежно від температури нагрівання, виконавши відповідні математичні перетворення, отримаємо таке рівняння:

$$\frac{\rho}{\gamma \cdot S^2 \cdot c} \cdot i(t)^2 dt = \frac{d\theta}{1 + \alpha \cdot \theta}, \quad (2)$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м;

$\gamma$  – питома густина матеріалу провідника, кг/м<sup>3</sup>,

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору, 1/К;

$S$  – площа поперечного перерізу провідника, м<sup>2</sup>;

$\theta$  – температура провідника, °С.

Рівняння (2) описує баланс енергій, в якому ліва частина відображає електричну енергію струму блискавкорозряду, а права частина – теплову енергію нагрітого провідника струмом блискавки.

Інтегруючи ліву частину рівняння (2) в межах часу протікання струму блискавки, а праву – в межах зміни температури від початкового до кінцевого значення, отримаємо:

$$\frac{\rho \cdot \alpha}{\gamma \cdot S^2 \cdot c} \int_0^{t_k} i(t)^2 dt = \int_{\theta_p}^{\theta_k} \frac{d\theta}{1 + \alpha \cdot \theta}, \quad (3)$$

де  $t_k$  – час протікання струму блискавки через провідник системи блискавкозахисту, с;

$\theta_p$  – початкова температура провідника, °С;

$\theta_k$  – температура, до якої нагрівається провідник в результаті дії струму блискавки, °С.

Проінтегрувавши праву частину рівняння (3) за температурою, отримуємо залежність у вигляді:

$$\frac{\rho \cdot \alpha}{\gamma \cdot S^2 \cdot c} \int_0^{t_k} i(t)^2 dt = \ln\left(\theta_k - \alpha^{-1}\right) - \ln\left(\theta_p - \alpha^{-1}\right) \quad (4)$$

Здійснивши необхідні перетворення з рівняння (4) отримаємо вираз для розрахунку температури, до якої нагрівається провідник в результаті протікання струму блискавки з врахуванням його початкової температури

$$\theta_k = \left( \theta_p + \frac{1}{\alpha} \right) \cdot \exp \left( \frac{\rho \alpha \int_0^{t_k} i(t)^2 dt}{\gamma \cdot S^2 \cdot c} \right) - \frac{1}{\alpha}, \quad (5)$$

Рівняння (5) дозволяє оцінювати температуру нагрівання провідника систем блискавкозахисту за відомим миттєвим значенням струму блискавки, отриманим, наприклад, шляхом осцилографування, при цьому ми знаходимо лише кінцеве значення температури, а не зміну температури в часі.

У випадку стандартизованої форми імпульсу струму блискавки 10/350 мкс з максимальним значенням рівним  $I_{max}$  можна обчислити питому величину енергії за умови, що опір

проводу дорівнює 1 Ом згідно з виразом  $\int_0^{t_k} i(t)^2 dt$ . З використанням прикладного програмного комплексу MathCAD-14 для наведених в [3] максимальних значень імпульсів струму блискавки отримано значення питомих енергій, які наведені в таблиці 1, звідки видно, що у випадку лінійного зростанням величини імпульсу струму блискавки значення питомої енергії зростає гіперболічно.

**Таблиця 1**

*Значення питомих енергій для стандартизованих імпульсів струму блискавки з формою хвилі 10/350 мкс*

$I_{max}$ , кА	100	150	200
$\int_0^{t_k} i(t)^2 dt$ , Дж/Ом	2569334	5781002	10277337

Для випадку, коли струм блискавки складається із серії з кількох послідовних імпульсів, відбувається додаткове нагрівання провідників систем блискавкозахисту, яке обчислюється згідно з рівнянням (5), при цьому за початкову температуру приймається температура, до якої нагрівається провідник попереднім імпульсом струму блискавки. В таблиці 2 для стандартизованої форми імпульсу струму блискавки 0,25/100 мкс з максимальним значенням рівним  $I_{max}$  наведено значення питомих величин енергії за умови, що опір проводу дорівнює 1 Ом.

**Таблиця 2**

*Значення питомих енергій для стандартизованих імпульсів струму блискавки з формою хвилі 0,25/100 мкс*

$I_{max}$ , кА	25	37,5	50
$\int_0^{t_k} i(t)^2 dt$ , Дж/Ом	45320	101969	181279

З метою оцінки процесів нагрівання провідників систем блискавкозахисту залежно від часу, рівняння (2) розв'яжемо з використанням чисельного методу формул диференціювання назад [4], яке запишеться у вигляді:

$$\begin{aligned} & \left( a_0 \cdot h^{-1} - \frac{\rho \cdot \alpha}{\gamma \cdot S^2 \cdot c} i(t)^2 \right) \Delta \theta_{k+1} = \\ & = \left( a_0 \cdot h^{-1} - \frac{\rho \cdot \alpha}{\gamma \cdot S^2 \cdot c} i(t)^2 \right) \theta_{k+1} + a_1 \cdot h^{-1} \theta_k + a_2 \cdot h^{-1} \theta_{k-1} - \frac{\rho}{\gamma \cdot S^2 \cdot c} i(t)^2, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $h$  – крок інтегрування, с;

$a_0, a_1$  і  $a_2$  – коефіцієнти корекції згідно з методом ФДН другого порядку;  
 $\Delta\theta_{k+1}$  – приріст температури в  $k+1$  точці інтегрування,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\theta_{k+1}, \theta_k, \theta_{k-1}$  – значення температури у відповідних точках інтегрування,  $^{\circ}\text{C}$ .

Моделювання процесу грозорозряду з використанням математичної моделі [5] та моделі (6) дозволяє отримати часову залежність зміни температури нагрівання провідника струмом блискавки.

Для підтвердження адекватності математичної моделі (5) в таблицях 3 і 4 наведено результати розрахунку температур нагрівання сталюого провідника з параметрами  $\rho=0,7 \cdot 10^{-6}$  Ом·м,  $\alpha=0,8 \cdot 10^{-3}$  1/К,  $\gamma=8000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c=500$  Дж/(кг·К), струмом блискавки, що складається з одного, двох і трьох послідовних імпульсів з формами хвилі першого імпульсу 10/350 мкс та наступних з формою хвилі 0,25/100 мкс з початковими температурами провідника  $\theta_p=0$   $^{\circ}\text{C}$  і  $\theta_p=20$   $^{\circ}\text{C}$  відповідно.

**Таблиця 3**

*Результати розрахунку температури нагрівання струмом блискавки сталюого провідника за умови його початкової температури  $\theta_p=0$   $^{\circ}\text{C}$*

Переріз провідника, мм <sup>2</sup>	$I_{max1}$ , кА	100	150	200	100	150	200	100	150	200
	$I_{max2}$ , кА	-	-	-	25	37,5	50	25	37,5	50
	$I_{max3}$ , кА	-	-	-	-	-	-	25	37,5	50
25		972,6	*	*	995,3	*	*	1018,2	*	*
50		193,4	477,9	972,6	197,1	487,8	995,3	200,8	497,7	1018,2
100		45,8	105,4	193,4	46,6	107,3	197,1	47,4	109,3	200,8

**Таблиця 4**

*Результати розрахунку температури нагрівання струмом блискавки сталюого провідника за умови його початкової температури  $\theta_p=20$   $^{\circ}\text{C}$*

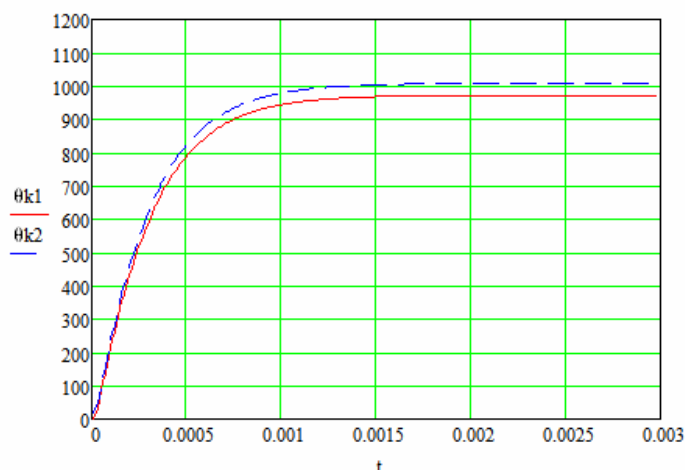
Переріз провідника, мм <sup>2</sup>	$I_{max1}$ , кА	100	150	200	100	150	200	100	150	200
	$I_{max2}$ , кА	-	-	-	25	37,5	50	25	37,5	50
	$I_{max3}$ , кА	-	-	-	-	-	-	25	37,5	50
25		1008,2	*	*	1031,2	*	*	1054,5	*	*
50		216,5	505,5	1008,2	220,3	515,6	1031,2	224,0	525,7	1054,5
100		66,5	127,1	216,5	67,4	129,0	220,3	68,2	131,0	224,0

Порівняння результатів, наведених в таблицях 3 і 4, показує, що не достатня точність наведених у [3] значень питомих енергій, неврахування початкової температури провідника до моменту появи струму блискавки і додаткового нагрівання провідників струмом блискавки, що складається з серії із кількох послідовних імпульсів, призводить до занижених значень кінцевих температур нагрівання провідників систем блискавкозахисту. Крім того, всі розрахунки температурних режимів провідників систем блискавкозахисту здійснюються з врахуванням прийнятої усередненої форми імпульсу струму блискавки [3], яка в багатьох випадках сильно відрізняється від реальних кривих.

В таблицях 3 і 4 „\*” позначено переріз сталюого провідника, що не може використовуватись для влаштування систем блискавкозахисту, оскільки температура, до якої він нагрівається струмом блискавки, перевищує температуру його плавлення.

Для форм струмів, отриманих шляхом осцилографування, котрі мають достатньо широкий діапазон зміни форми імпульсу в порівнянні зі стандартизованим, доцільно використовувати модель (6), яка дозволяє моделювати процес нагрівання провідника в часі за миттєвими значеннями струму блискавки будь-якої форми.

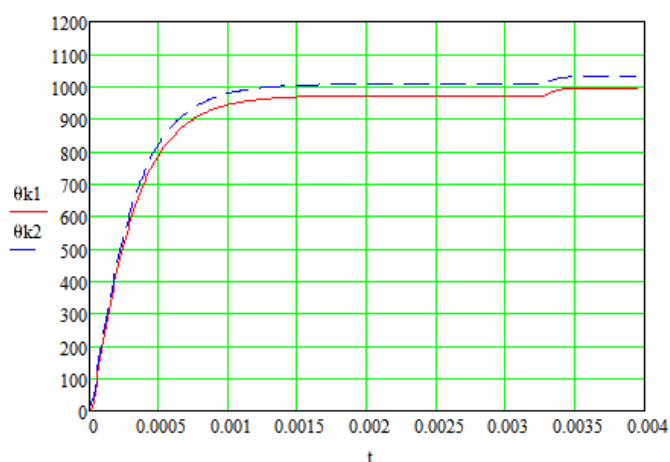
З використанням моделі (6) виконано розрахунок процесу нагрівання сталевго провідника перерізом  $S=50 \text{ мм}^2$  струмом блискавки з амплітудою  $I_{max}=200 \text{ кА}$  та формою хвилі  $10/350 \text{ мкс}$ , за умов початкових температур  $\theta_p=0 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $\theta_p=20 \text{ }^\circ\text{C}$ , результати якого представлено на рис. 1.



**Рис.1.** Залежність зміни температури нагрівання сталевго провідника перерізом  $50 \text{ мм}^2$  струмом блискавки з амплітудою  $200 \text{ кА}$

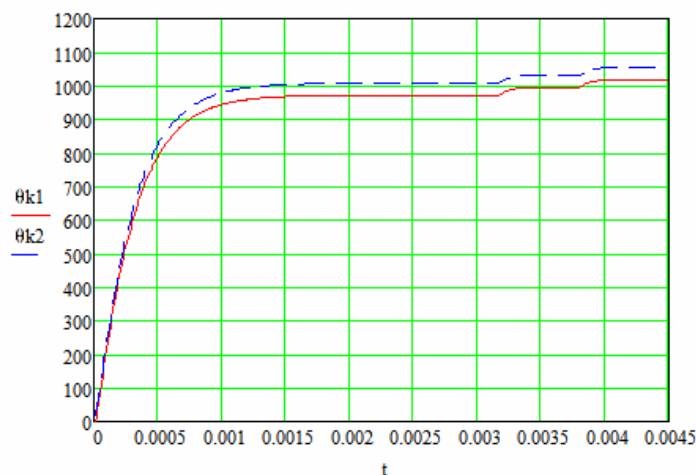
Встановлено, що за час приблизно  $1,5 \text{ мс}$  та початкової температури  $\theta_p=0 \text{ }^\circ\text{C}$  провідник плавно нагрівається до усталеної температури  $\theta_k=972,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , а за умов, коли  $\theta_p=20 \text{ }^\circ\text{C}$ , провідник за час приблизно  $1,7 \text{ мс}$  нагрівається до усталеної температури  $\theta_k=1008,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

У випадку, якщо струм блискавки складається з двох імпульсів з амплітудою другого імпульсу  $I_{max}=50 \text{ кА}$  та формою хвилі  $0,25/100 \text{ мкс}$  за вихідних умов попереднього експерименту в першому випадку за час приблизно  $0,2 \text{ мс}$  провідник плавно нагрівається до температури  $\theta_k=995,3 \text{ }^\circ\text{C}$ , а в другому випадку за час приблизно  $0,25 \text{ мс}$  – до температури  $\theta_k=1031,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 2.).



**Рис.2.** Залежність зміни температури нагрівання сталевго провідника перерізом  $50 \text{ мм}^2$  струмом блискавки з амплітудою першого імпульсу  $200 \text{ кА}$  і одним повторним імпульсом з амплітудою  $50 \text{ кА}$

На рис. 3. наведено часові залежності температур нагрівання сталевго провідника струмом блискавки, що складається з серії із трьох послідовних імпульсів з стандартизованими формами хвиль і амплітудами 200, 50 і 50 кА. В цьому випадку провідник нагрівається за умови початкової температури  $\theta_p=0$  °С до температури  $\theta_k=1018,2$  °С. Якщо початкова температура провідника становить  $\theta_p=20$  °С, значення кінцевої температури становить  $\theta_k=1054,5$  °С.



**Рис.3.** Залежність зміни температури нагрівання сталевго провідника перерізом 50 мм<sup>2</sup> струмом блискавки з амплітудою першого імпульсу 200 кА і двома повторними імпульсами з амплітудами 50 кА

Як видно з наведених результатів повторні імпульси струму блискавки, хоч і мають значно меншу енергію, в порівнянні з першим імпульсом, призводять до додаткового нагрівання провідників систем блискавкозахисту, що необхідно враховувати під час проектування таких систем.

Значення температур, до яких нагрівається провідник струмом блискавки, отримані за результатами моделювання згідно з (6), для стандартизованих імпульсів струму блискавки, повністю збіглися з результатами, отриманими за моделлю (5), що свідчить про належну адекватність моделі.

Отримані математичні моделі (5) та (6) дозволяють з достатньою для практики точністю оцінювати температури нагрівання провідників систем блискавкозахисту для будь-яких форм струму блискавки.

Результати розрахунків співставлено із даними, наведеними в стандарті міжнародної електротехнічної комісії [3], який на сьогодні є єдиним загальновикористовуваним документом, згідно з яким здійснюється вибір провідників під час проектування систем блискавкозахисту із врахуванням температури їх нагрівання.

**Висновки.** 1. З врахуванням особливостей протікання електротеплових процесів у металевих провідниках систем блискавкозахисту від дії струму блискавки отримано моделі, які дозволяють з достатньою для практики точністю розрахувати температуру нагрівання провідників.

2. Математичні моделі (5) і (6) дозволяють отримувати більш точні результати в порівнянні з стандартом міжнародної електротехнічної комісії, оскільки враховує початкову температуру провідника та додаткове нагрівання повторними імпульсами струму блискавки.

3. Сформовані математичні моделі можуть бути успішно використанні для проектно-оціночних робіт та під час експертиз негативних наслідків удару блискавки в наземні об'єкти.

#### Список літератури:

1. Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений. – Москва: Энергия. – 1976. – 488с.
2. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
3. IEC 62305-1 Protection against lightning – Part 1: General principles
4. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. 3-є вид. Перер. і доп. – Львів: Вища школа. – 1989. – 464 с.
5. Гудим В.І. Математична модель грозорозрядних процесів / Гудим В.І., Кінаш Б.М., Юрків Б.М. // Збірник наукових праць. – Пожежна безпека: теорія і практика. ЧАПБ. Черкаси. 2008. – с.11-16.

*В.И. Гудым, д-р техн. наук, профессор, Б.М.Юркив (Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности)*

### ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ СИСТЕМ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

В статье описаны возможные негативные последствия, которые возникают в результате нагревания током молнии проводников систем блискавкозахисту. В результате сложности экспериментальных исследований температур нагревания в реальных условиях, целесообразнее всего их проводить методами математического моделирования. Сформированы математические модели для оценки конечных температур и хода процессов нагревания проводников систем молниезащиты током молнии позволяют с высокой точностью исследовать процессы нагревания проводников импульсами токов молнии стандартизированной формы и реальными импульсами, полученными путем осциллографування. Результаты расчетов сравнивались с данными, приведенными в международном стандарте и подтвердили их достаточную сходимость.

**Ключевые слова:** молниезащита, математические модели, ток молнии, нагревания проводников

*V.I. Hudym, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, B.M. Yurkiv (Lviv State University of Vital Activity Safety)*

### ASSESSMENT OF THE TEMPERATURE OF HEATING OF METAL CONDUCTORS OF LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS

The article deals with the negative consequences of the heating from shock lightning protection systems. Due to the complexity of experimental studies of temperature heating in the wild, they spend most expedient method of mathematical modeling. Mathematical models for the assessment of final temperatures and course of the processes of heating systems allow to investigate the processes of heating of conductors by pulses of lightning of standardized forms and real impulses received by oscillographing. The calculation results were compared with data given in international standards and confirmed their sufficient convergence.

**Key words:** lightning safety, mathematical models, current of lightning, heating of conductors

