

*М.І. Баранов, д.т.н., с.н.с., НТУ «ХП»,  
С.В. Рудаков, к.т.н., доцент, НУЦЗУ*

## **ВИНИКНЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ОСЕРЕДКІВ ПОЖЕЖІ КАБЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ ПРИ ДІЇ НА НЕЇ НАДСТРУМІВ**

(представлено д-ром техн. наук Росохою С.В.)

Показано, що при протіканні надструмів в електричних ланцюгах імпульсного струму електроенергетичних об'єктів короточасний інтенсивний локальний нагрів струмопровідних частин ізольованих проводів і кабелів у зонах їх «гарячих» поздовжніх ділянок з щільністю надструмів  $100 \text{ А/мм}^2$  може стати причиною виникнення локальних осередків пожежі в місцях прокладки кабельної продукції.

**Ключові слова:** електричні проводи та кабелі, надструм, локальний нагрів.

**Постановка проблеми.** Електричні проводи і кабелі [1], використовувані на енергетичних об'єктах, при певних умовах (наприклад, при коротких замиканнях, виникненні комутаційних або атмосферних перенапруг та інших нештатних режимах роботи) можуть короточасно відчувати вплив значних струмових перевантажень [2, 3]. Такі струмові перевантаження характеризуються протіканням по кабельно-провідникової продукції (КПП) змінних надструмів з амплітудами у десятки кілоампер [3, 4] і призводять до появи в жилах і оболонках КПП струму щільністю з амплітудним значенням від 10 до  $150 \text{ А/мм}^2$ . Це викликає значне нагрівання провідникових матеріалів КПП, приводить до неприпустимого перегріву струмопровідного матеріалу жил (оболонки) проводів (кабелів) і відповідно їх ізоляції. Причому, найбільш виражений прояв перегріву проводів (кабелів) спостерігатися в місцях виникнення підвищеної об'ємної щільності дрейфуючих електронів – на так званих "гарячих" поздовжніх ділянках [5]. Причиною такої локалізації дрейфуючих електронів у жилах проводів і кабелів з електричним струмом є виникнення в струмопровідних частинах зазначеної КПП квантованих електронних півхвиль де Бройля і відповідно обумовлених ними електронних хвильових пакетів (ЕХП) [6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [5, 7] нами були представлені результати теоретичних досліджень, що визначають основні закономірності розподілу амплітудно-часовими параметрами (АЧП) вільних електронів у металевих провідниках з електричним струмом різних АЧП. З даних закономірностей випливає, що ступінь макролокалізації вздовж струмопровідних частин проводів і кабелів з

електричним струмом провідності "гарячих" поздовжніх ділянок істотно залежить від чисельних значень щільності струму в них. Для запобігання можливих надзвичайних ситуацій в силових ланцюгах електроенергетичних об'єктів та забезпечення їх протипожежного захисту практичну зацікавленість представляє завдання визначення основних геометричних розмірів "гарячих" поздовжніх ділянок в проводах (кабелях) промислових електромереж, досягнутих рівнів максимальної температури  $\theta_2$  на них в залежності від величин щільності надструмів  $\delta_0(t)$  в струмопровідних частинах КПП.

**Постановка завдання та його вирішення.** Для наближеного визначення мінімальної ширини  $\Delta z_2$  "гарячого" поздовжнього ділянки струмопровідної жили (оболонки) проводу (кабелю) довжиною  $l_0$  поперечним перерізом  $S_0$  з рівномірно розподіленим по ним електричним надструмом провідності різних АЧП відомим у квантовій електродинаміці співвідношенням невизначеностей Гейзенберга [8], можна показати, що з урахуванням даних [9] для шуканої величини  $\Delta z_2$  слід наступне розрахункове співвідношення

$$\Delta z_2 = e_0 n_{e0} h (m_e \delta_{0m})^{-1} [8 + (\pi - 2)^2]^{-1}, \quad (1)$$

де  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – модуль електричного заряду електрона [9];  $n_{e0}$  – усереднена об'ємна щільність вільних електронів у металі проводу (кабелю) до протікання по ньому струму;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постійна Планка [9];  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – маса спокою електрону [9];  $\delta_{0m}$  – амплітуда щільності струму  $\delta_0(t)$  в струмопровідному матеріалі проводу (кабеля), яка дорівнює  $I_{0m} / S_0$  у прийнятому нами наближенні;  $I_{0m}$  – амплітуда струму провідності  $i_0(t)$ , що протікає в проводі (кабелі). З (1) випливає, що ширина  $\Delta z_2$  "гарячої" поздовжнього ділянки струмопровідної жили (оболонки) проводу (кабелю) обернено пропорційна величині амплітуди  $\delta_{0m}$  щільності надструмів. В роботі [10] показано, що для мідного дроту мінімальна ширина  $\Delta z_2$  "гарячої" ділянки в ньому становить близько 530 мм., а розрахункова найменша ширина "гарячої" ділянки в мідному дроті, що визначена за (1) буде дорівнювати близько 5,3 мм. З наданих розрахункових даних випливає, що поздовжня макролокалізація дрейфуючих електронів в проводах (кабелів) з електричним струмом  $i_0(t)$  найбільш яскраво проявляється і може візуально фіксуватися при великих щільностях  $\delta_0(t)$  надструму в них, становлять близько 100 А/мм<sup>2</sup> і більше. У зв'язку з тим, що подібна поздовжня локалізація вільних електронів в струмопровідних частинах проводів (кабелів) супроводжу-

ється підвищеною об'ємною щільністю  $n_{e2}$  на "гарячих" поздовжніх ділянках (до 3,5 разів по відношенню до вихідної усередненої об'ємної електронної щільності  $n_{e0}$  в металі провуда або кабелю) [5, 11] при значних щільностях надструму  $\delta_0(t)$  в провудах (кабелях), розглянуті "гарячі" ділянки будуть характеризуватися підвищеними рівнями температури  $\theta_2$ . Враховуючи квантований характер розподілу півхвиль де Бройля, поздовжні координати  $z_{nk}$  місць розміщення середин крайніх "гарячих" поздовжніх ділянок від обох країв провудів (кабелів) завдовжки  $l_0$  визначаються виразом

$$z_{nk} = l_0 / (2n), \quad (2)$$

де  $n = 1, 2, 3, \dots, n_m$  – ціле квантове число, рівне номером моди власної поздовжньої хвильовий псі-функції в токопровудящем матеріалі жили (оболонки) провуду (кабелю);  $n_m = 2n_k^2$  – максимальне значення квантового числа  $n$ , мінімальне значення якого дорівнює 1;  $n_k$  – головне квантове число, дорівнює кількості електронних оболонок в атомі струмопровудної жили (оболонки) провуду (кабелю) (наприклад, для мідного, цинкового і залізного (сталевого) струмопровудів  $n_k = 4$ , а  $n_m = 32$ ) [9]. Координати місць періодичного розміщення в розглянутих провудах (кабелях) довжиною  $l_0$  із надструмом  $i_0(t)$  задовольняють співвідношенню

$$z_{nb} = l_0 / n. \quad (3)$$

Для розрахунку максимальної температури на "гарячих" поздовжніх ділянках КПП з надструмом скористаємося співвідношенням

$$\theta_2 = 8\pi c_0^{-1} \Delta z_2 l_0^{-1} n_{e0} W_{Fe} [8 + (\pi - 2)^2]^{-1} + \theta_0, \quad (4)$$

де  $c_0$  – питома теплоємність, віднесена до одиниці об'єму металу провуду (кабелю);  $W_{Fe} = 0,6 h^2 (8m_e)^{-1} (3n_{e0} / \pi)^{2/3}$  – усереднене значення енергії Фермі для вільних електронів металу провуду (кабелю) з об'ємною щільністю  $n_{e0}$  до протікання по ньому надструму [9];  $\theta_0$  – вихідна температура ізоляційного середовища.

Для розрахункової оцінки усередненої концентрації  $N_0$  атомів у металі струмопровудних частин провуду (кабелю) з його масової щільністю  $d_0$  до протікання по ньому електричного струму слід скористатися співвідношенням [10]

$$N_0 = d_0 (M_a \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27})^{-1}, \quad (5)$$

де  $M_a$  – атомна маса металу проводу або кабелю (наприклад, для міді вона згідно з періодичною системою хімічних елементів Менделєєва в атомних одиницях маси дорівнює  $M_a = 63,55$  [9]), практично дорівнює масовому числу ядра атома металу проводу (кабелю).

Розрахункова оцінка температури  $\theta_x$  нагріву "холодних" поздовжніх ділянок проводу (кабелю), що примикають ліворуч і праворуч до їх "гарячим" поздовжнім ділянок з надструмом  $i_0(t)$ , може бути з урахуванням даних [5] виконана за наступною наближеною формулою

$$\theta_x = \theta_z (\pi - 2) / 4. \quad (6)$$

В роботі [10, 11] показано, що для сталевого дроту температура  $\theta_z$  короточасного локального джоульова нагріву на її "гарячої" поздовжньої ділянці може прийняти чисельне значення, що дорівнює приблизно  $1610$  °C (при температурі плавлення заліза близько  $1535$  °C [10]). В той же час температура прилеглих до нього відносно "холодних" поздовжніх ділянок даного сталевого дроту згідно (6) буде становити близько  $459$  °C. Тому зазначений провід у місцях формування уздовж нього "гарячих" поздовжніх ділянок буде піддаватися електротепловому руйнуванню. Крім того, так як максимальна температура невосгораемости для більшості ізолюваних проводів та кабелів на напругу (10-220) кВ становить не більше  $400$  °C [4, 10], то при зазначеній щільності надструму в струмонесучій частини цього проводу навколишня її ізоляція буде піддаватися займанню. Кількість таких місць різкого локального перегріву струмонесучої частини розглянутого проводу (місць появи уздовж нього вогнищ пожежі) буде визначатися згідно (2) і (3) значенням квантового числа  $n$ , що залежать від числа мод власних хвильових псі-функцій у ньому і відповідно від енергетичного стану вільних електронів струмопровідного матеріалу жили (оболонки) проводу (кабелю) в момент початку впливу на нього надструму.

Експерименти, що підтверджують формування в струмопровідних частинах проводів (кабелів) з імпульсним надструмом  $i_0(t)$  електронних півхвиль де Бройля, і "гарячих" поздовжніх ділянок, що були виконані за допомогою потужного високовольтного генератора імпульсних струмів ГТ-5С (номінальна зарядна напруга  $U_{3Г} = \pm 5$  кВ). При розряді попередньо зарядженої конденсаторної батареї генератора ГТ-5С ( $U_{3Г} = -3,7$  кВ,  $W_{Г} = 310$  кДж) на досліджуваний провід по ньому про-

тівав аперіодичний імпульс надструмів тимчасової форми 9 мс/576 мс з модулем амплітуди  $I_{0m} = 745 \text{ A}$  ( $\delta_{0m} \approx 370 \text{ A/мм}^2$ ).

На рис. 1 наведено результати електротермічного впливу аперіодического імпульсу надструмів тимчасової форми 9 мс/576 мс ( $I_{0m} = 745 \text{ A}$ ;  $\delta_{0m} \approx 370 \text{ A/мм}^2$ ) на оцинкований сталевий провід.



**Рис. 1.** Тепловий стан оцинкованого сталевго провду ( $d = 0,8 \text{ мм}$ ;  $l = 320 \text{ мм}$ ;  $\delta = 5 \text{ мкм}$ ;  $S = 2,01 \text{ мм}^2$ ) з однією "гарячою" (шириною  $\approx 7 \text{ мм}$ ) та двома "холодними" (шириною близько  $156,5 \text{ мм}$  при частковій сублімація однієї з них) поздовжніми ділянками після впливу на нього аперіодического імпульсу надструмів тимчасової форми 9 мс/576 мс великої щільності ( $I = 745 \text{ A}$ ;  $\delta \approx 370 \text{ A/мм}^2$ ;  $n = 1$ )

Видно, що в цьому випадку у провіді виникає одна "гаряча" ( $n=1$ ) і дві "холодних" поздовжніх ділянки. Ширина "гарячої" поздовжнього ділянки при цьому становить  $\Delta z_2 \approx 7 \text{ мм}$  (при її розрахункової величині з (1) в  $5,7 \text{ мм}$ ), а ширина "холодних" поздовжніх ділянок виявляються рівними близько  $156,5 \text{ мм}$ . Місце розміщення "гарячої" поздовжнього ділянки знаходиться посередині дроту і відповідає розрахунковому виразу (2) для випадку, коли  $n=1$ . "Гаряча" ділянка провду з-за розплавлення на її ширині  $\Delta z_2$  сталевго основи та закипання цинкового покриття приймає яскраво випромінююче світло сферообразну форму. Температура нагріву "гарячої" поздовжньої ділянки провду в цьому випадку досягає рівня, достатнього для проплавлення наскрізь теплозахисного азбестового полотна завтовшки  $3 \text{ мм}$ , яке перебуває під цією ділянкою, температура плавлення якої становить близько  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ . На такий тепловий стан "гарячої" ділянки досліджуваного провду вказують і результати математичного моделювання [10].

**Висновки.** Виконані розрахункові оцінки та проведені експерименти вказують на те, що при короткочасному протіканні по ізо-

льованим проводам силових ланцюгів електроенергетичних об'єктів надструму великої щільності ( $100 \text{ А/мм}^2$  і більше), металеві жили (оболонки) даної КПП можуть відчувати в зонах виникнення вздовж них вузьких "гарячих" поздовжніх ділянок інтенсивний локальний нагрів. При цьому температура нагріву в зонах "гарячих" поздовжніх ділянок проводів (кабелів) може до 3,5 разів перевищувати температуру нагрівання сусідніх з ними "холодних" поздовжніх ділянок і досягати температури плавлення їх основних провідникових матеріалів – міді, алюмінію і сталі. Поява в екстремальних ситуаціях на "гарячих" поздовжніх ділянках проводів таких високих температур може призводити до їх локального електротермічного руйнування, загоряння їх ізоляції та відповідно до виникнення локальних вогнищ пожежі в зоні прокладання КПП.

Встановлено, що основні геометричні розміри "гарячих" поздовжніх ділянок проводів (кабелів) і поздовжні координати місць їх розміщення вздовж них визначаються амплітудою щільності електричного надструмів  $i_0(t)$  різних АЧП, які протікають по них і значенням квантового числа  $n$ , яке відповідає вільним електронам їх струмопровідного матеріалу у момент його впливу на зазначену КПП. Отримані розрахункові та експериментальні результати свідчать про те, що для зниження рівня пожежної небезпеки електричних мереж від інтенсивного локального нагрівання струмопровідних частин КПП на їх "гарячих" поздовжніх ділянках в аварійних режимах роботи, повинні встановлюватися відповідні швидкодіючі системи захисту від перенапруг та зазначених надструмів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева; Под ред. Н.И. Белоруссова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
2. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Высшая школа, 1972. – 431 с.
3. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии / Под общей ред. И.Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, Том 3, кн. 1, 1988. – 880 с.
4. НПБ 248-97. Кабели и провода электрические. Показатели пожарной опасности. Методы испытаний. – М.: ВНИИПО МВД России, 1998. – 7 с.
5. Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределения электрического тока проводимости в проводнике // Технічна електродинаміка (Київ). – 2007. – №1. – С. 13-19.

6. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач.– Харьков: НТУ “ХПИ”, 2009. – 384 с.

7. Баранов М.И. Усредненные характеристики волнового распределения дрейфующих электронов в металлическом проводнике с импульсным током проводимости большой плотности / М.И. Баранов, С.В. Рудаков // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: “Техніка та електрофізика високих напруг”.– Харків: НТУ “ХПІ”, 2013.– № 60 (1033).– С. 12-20.

8. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.– Киев: Наукова думка, 1989.– 864 с.

9. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.– М.: Наука, 1990. – 624 с.

10. Баранов М.И. Пожарная опасность локального нагрева проводов и кабелей электрических сетей при сверхтоках / М.И. Баранов, С.В. Рудаков // Пожаровзрывобезопасность. – № 10. – Том 23. – Москва, 2014. – С. 48-54.

11. Баранов М.И. Пожароопасное действие кратковременных импульсных сверхтоков в электрических кабелях / М.И. Баранов, С.В. Рудаков // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2014. – Вып. 35. – С. 19-25. – Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol35/baranov.pdf>.

М.И. Баранов, С.В. Рудаков

**Возникновение локальных очагов пожара кабельной продукции при действии на нее сверхтоков**

Впервые в области пожарной безопасности показано, что при протекании сверхтоков в электрических цепях импульсного тока электроэнергетических объектов кратковременный интенсивный локальный нагрев токонесущих частей изолированных проводов и кабелей в зонах их «горячих» продольных участков с плотностями сверхтока  $100 \text{ А/мм}^2$  может стать причиной возникновения локальных очагов пожара в местах прокладки кабельной продукции.

**Ключевые слова:** электрические провода и кабели, сверхток, локальный нагрев.

M.I. Baranov, S.V. Rudakov

**The emergence of local fire cable products under the action of the overcurrent**

First exposed feature of the electro-thermal brief intensive local heating of current-carrying parts of the isolated wires and cables at considerable current overloads in electric networks with the overcurrent of different peak-temporal parameters, causing appearance in them of closenesses of current  $100 \text{ A/mm}^2$  and more, allows from the new scientifically grounded positions to examine possible reasons of burning of cable-explorer products and origin on the electroenergy objects of sudden fires.

**Keywords:** electric wires and cables, overcurrent, brief local heating.