

*М.И. Баранов, д.т.н., гл. научн. сотр., НТУ «ХПИ»,  
С.В. Рудаков, к.т.н., доцент, НУГЗУ*

## **ПОЖАРООПАСНОЕ ДЕЙСТВИЕ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СВЕРХТОКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЯХ**

(представлено д-ром техн. наук Прохачем Э.Е.)

На основе расчетных и экспериментальных данных впервые в области пожарной безопасности показано, что при протекании сверхтоков в силовых электрических цепях кратковременный интенсивный локальный нагрев токонесущих частей изолированных проводов и кабелей в зонах их “горячих” продольных участков может стать причиной электротермического разрушения, возгорания изоляции и внезапного возникновения локальных очагов пожара в местах прокладки кабельно-проводниковой продукции.

**Ключевые слова:** кабель, свободные электроны, импульсный ток, характеристики радиального распределения электронов.

**Постановка проблемы.** В 2013 году в Украине зафиксировано 61114 пожаров, прямой ущерб от которых составил около 480 млн. грн. [1]. Вследствие пожаров погибло 3310 людей, в том числе 85 детей и подростков. Уничтожено и повреждено 21 830 зданий и сооружений. Львиную долю причин возникновения пожаров занимает короткое замыкание (КЗ) в электропроводке. В связи с непрерывным ростом энергооборуженности в промышленности, общим увеличением протяженности кабельных трасс, недостаточной пожаростойкостью конструкций кабелей пожары, вызываемые их возгоранием, случаются довольно часто (22,8 % пожаров) [1]. Если учесть, что из этого общего количества пожаров каждый четвертый возникает из-за неисправностей и аварийных ситуаций в системе электроснабжения и, как правило, на объектах с высокой концентрацией электрических кабелей, становится очевидной необходимость углубленного анализа причин возникновения таких пожаров с целью принятия возможных технических мер по их недопущению. Среди этих причин можно выделить следующие:

- не соответствующее современным требованиям общее состояние существующих отечественных кабельных трасс, средний срок эксплуатации большинства из которых превысил 15 лет;

- значительная, все более увеличивающаяся для вновь сооружаемых кабельных трасс протяженность, что способствует распространению пламени на большое расстояние при возникновении пожара (в особенности в случае применения пучков кабелей с пределом

распространения горения, не соответствующего требованиям стандартов МЭК 60332-3; ГОСТ 12176-89; ДСТУ ІЕС 60332-3:2004);

- высокое процентное содержание горючих полимерных материалов в кабельно-проводниковой продукции (в особенности в ранее выпускавшейся);

- возникновение в сетях токовых перегрузок.

Как известно, перегрузка электрической сети в бытовых условиях может наступить, в частности, при использовании дополнительных обогревательных электроприборов в холодное время года, в случае аварии в системе водяного отопления и т.п. Несмотря на то, что согласно ПУЭ внутренние электросети жилых и административных зданий должны быть защищены от перегрузки, всё же защитные аппараты допускают определенную перегрузку токопроводящих частей кабелей. Это связано с тем, что надежное срабатывание защитных предохранителей происходит при токах, превышающих  $1,6 I_{ном}$ , а автоматов –  $1,45 I_{ном}$ , где  $I_{ном}$  – номинальное значение тока.

Кроме того, при импульсных токовых перегрузках срабатывание предохранителей происходит при токах, превышающих в несколько раз их номинальные значения из-за кратковременности действия токовых импульсов.

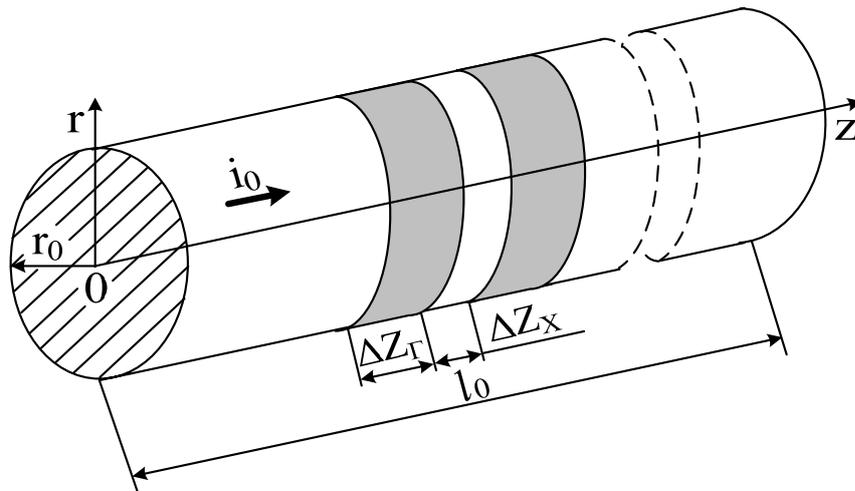
**Постановка задачи и её решение.** В последнее время [2-3] обнаружено новое электрофизическое явление сверхтока в кабельных линиях, которое может приводить резкому перегреву их токонесущих частей. При этом нагрев токопроводящих жил кабеля происходит на его отдельных участках, а не равномерно по всей его длине. Этот эффект локальной концентрации тепловой энергии на отдельных участках кабеля может приводить к местным перегревам (возгоранию) и возникновению очагов пожара. Объяснить этот эффект с позиции только классической теории электрических цепей не представляется возможным. Поэтому целью работы является исследование влияния действия кратковременных импульсных сверхтоков на неравномерный нагрев электрического кабеля, вызываемый явлением локализации дрейфующих электронов в его токонесущих частях.

Рассмотрим явление локального возгорания электрического кабеля с позиций квантовой электродинамики и пожарной безопасности. Протекание электрического тока проводимости различных видов и плотностей по металлическим проводникам сопровождается распространением электронных полуволн де Бройля [3], взаимодействие которых образует вдоль проводника макроскопическую периодическую структуру. Данная структура формирует в проводнике «горячие» и «холодные» участки [2], температура материала которых может существенно изменяться (рис. 1).

Для медного, цинкового и железного (стального) проводников, для которых согласно периодической системе химических элементов

Д.И. Менделеева главное квантовое число равно  $n_k=4$  [4], где  $n_k$  – главное квантовое число, равное числу электронных оболочек в изолированном атоме металла проводника. Возможное максимальное значение квантового числа  $n$  для дискретных мод волновых пси-функций  $\psi_{nz}(z,t)$ , суперпозиция которых формирует в микроскопической структуре электропроводящего материала исследуемого проводника макроскопическую вдоль длины  $l_0$  структуру волновых электронных пакетов (ВЭП) [3-5], может численно составлять  $n_m=32$ . При одинаковом квантованном энергетическом состоянии дрейфующих свободных электронов (например, при  $n=3$ ) им в указанном случае на длине  $l_0$  проводника будут всегда соответствовать три полуволны де Бройля длиной  $\lambda_{enz}/2$  и соответственно три ВЭП в области их (этих полуволн) амплитуд. При этом каждая длина  $\lambda_{enz}/2$  дебройлевской электронной полуволны в металле проводника с током проводимости различных амплитудно-временных параметров (АВП) будет выбираться из следующего соотношения [5, 6]

$$\lambda_{enz}/2=l_0/n. \quad (1)$$



**Рис. 1.** Схематическое изображение исследуемого круглого цилиндрического металлического проводника радиусом  $r_0$  и длиной  $l_0$  с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$ , содержащего относительно "горячие" шириной  $\Delta z_\gamma$  и относительно "холодные" шириной  $\Delta z_x$  продольные участки

Из (1) следует, что чем больше значение квантового числа  $n$ , тем будет меньше величина  $\lambda_{enz}/2$  и соответственно тем будет больше число ВЭП, периодически размещенных вдоль рассматриваемого нами проводника. При этом каждый ВЭП будет соответствовать так называемому относительно "горячему" продольному участку проводника. Между такими "горячими" продольными участками шириной  $\Delta z_\gamma$

на каждой длине  $\lambda_{enz}/2$  электронной полуволны де Бройля будут располагаться так называемые относительно "холодные" продольные участки шириной  $\Delta z_x$ . Причем, величина  $(\Delta z_z + \Delta z_x)$  будет характеризовать так называемый продольный шаг макроскопической периодической структуры ВЭП в металлическом проводнике.

Усредненная характеристика  $\bar{n}$  для целого квантового числа  $n$  в следующем приближенном виде

$$\bar{n} = (n_m - 1) / (\ln n_m). \quad (2)$$

Из (2) видно, что для медного, цинкового и железного (стального) проводников с током, для которых  $n_k=4$  и с учетом (1)  $n_m=32$ , усредненное значение  $\bar{n}$  для квантового числа  $n$  окажется примерно равным 9. С учетом найденного согласно (2) усредненного значения для целого квантового числа  $n$  остановимся на приближенном определении усредненных значений ширин "горячих"  $\Delta z_z^*$  и "холодных"  $\Delta z_x^*$  продольных участков исследуемого проводника с импульсным аксиальным током различных АВП. С этой целью воспользуемся фундаментальным принципом квантовой электродинамики (механики) – соотношением неопределенностей Гейзенберга [7]. Для локализуемых на "горячих" продольных участках проводника дрейфующих свободных электронов данное соотношение принимает вид [7]

$$\Delta z_z \cdot \Delta p_{zn} \geq h / (4\pi), \quad (3)$$

где  $\Delta p_{zn} = m_e v_{enz} = nh / (2l_0)$  – величина квантованной продольной проекции импульса дрейфующих в кристаллической микроструктуре проводника свободных электронов;  $v_{enz} = nh / (2m_e l_0)$  – квантованная скорость дрейфующих вдоль микроструктуры проводника свободных электронов [5];  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона [8];  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка [8].

Тогда из (3) при  $n = \bar{n}$  с учетом (4) для наименьшего квантованного значения усредненной ширины  $\Delta z_z^*$  "горячего" продольного участка металлического проводника с импульсным аксиальным током разных АВП получаем

$$\Delta z_z^* = l_0 / (2\pi\bar{n}) = l_0 \ln n_m / [2\pi(n_m - 1)]. \quad (4)$$

Учитывая, что на длине  $\lambda_{enz}/2$  или  $\lambda_{enz}^*/2$  каждой квантованной дебройлевской электронной полуволны размещается один "горячий" и один "холодный" продольный участок рассматриваемого металличе-

ского проводника, из (1) с учетом (2) и (4) для наибольшего квантованного значения усредненной ширины  $\Delta z_x^*$  "холодного" продольного участка нашего металлического проводника с импульсным аксиальным током произвольных АВП находим:

$$\Delta z_x^* = l_0 / (\bar{n}) - l_0 / (2\pi\bar{n}) = l_0 \ln n_m (2\pi - 1) / [2\pi(n_m - 1)]. \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что величина усредненной ширины  $\Delta z_x^*$  "холодного" участка металлического проводника с продольным импульсным током примерно в  $(2\pi - 1) \approx 5,3$  раз превышает усредненную ширину  $\Delta z_2^*$  его "горячего" участка. Кроме того, из этих приближенных расчетных выражений видно, что усредненные геометрические размеры "горячих" и "холодных" продольных участков проводника не зависят от АВП протекающего по ним импульсного тока, а определяются при его (нашего проводника) заданной длине  $l_0$  лишь величиной максимального значения  $n_m$  целого квантового числа  $n$ .

Экспериментально выявить в условиях научной лаборатории наличие "горячих" шириной  $\Delta z_2^*$  и "холодных" шириной  $\Delta z_x^*$  продольных участков в рассматриваемом металлическом проводнике можно, по мнению автора, только одним наглядным и реальным путем – путем пропускания по нему такого электрического тока, который вызывает интенсивный импульсный джоулев нагрев токопроводящего материала проводника. Причем, для опытного исследования такого нагрева проводника он должен быть без изоляции и содержать на его тугоплавком электропроводящем основании тонкое наружное легкоплавкое металлическое покрытие, закипающее и вспучивающееся на "горячих" продольных участках при протекании по проводнику тока большой плотности. Очевидно, что электрический ток в этом случае должен быть импульсным такой амплитуды и длительности, которые способны вызвать достижение в материале относительно тонкого проводника высоких температур.

При проведении эксперимента были использованы оцинкованный стальной провод [9] и мощная высоковольтная конденсаторная электроустановка – генератор импульсных токов типа ГИТ-5 (номинальное зарядное постоянное напряжение  $U_{3Г} = \pm 5$  кВ; номинальная запасаемая электрическая энергия  $W_{Г} = 567$  кДж), воспроизводящий на электрической активно-индуктивной нагрузке длительную аperiodическую компоненту тока линейной молнии (амплитуда  $I_{0m}$  импульса тока до 0,8 кА; протекающий электрический заряд  $Q_i$  до  $(200 \pm 20)$  Кл; полная длительность импульса  $\tau_p$  до 1000 мс) [10]. Результаты элек-

тротермического воздействия на выбранный стальной провод с цинковым покрытием толщиной  $\Delta_0=5$  мкм ( $r_0=0,8$  мм;  $l_0=320$  мм), включенный в разрядную цепь генератора ГИТ-5 ( $U_{3Г}=-3,7$  кВ;  $W_{Г}=310$  кДж), аperiodического импульса тока временной формы  $t_m/\tau_p=9$  мс/576 мс ( $t_m$  – время, соответствующее токовой амплитуде  $I_{0m}$ ) большой плотности ( $I_{0m}=-745$  А;  $\delta_{0m}=|I_{0m}|/S_0=0,37$  кА/мм<sup>2</sup>) показали, что при таком импульсном сверхтоке испытываемый провод разрушился. Экспериментальные результаты продольного волнового распределения ВЭП и соответствующих им "горячих" и "холодных" продольных участков в круглом сплошном цилиндрическом проводе хорошо согласуются с выполненными по (4) и (5) расчетными оценками усредненных геометрических характеристик указанных участков.

**Выводы.** Таким образом, приведенные результаты расчетов и экспериментальных исследований показывают, что при кратковременном протекании по изолированным кабелям электроэнергетических объектов больших плотностей импульсного сверхтока (100 А/мм<sup>2</sup> и более), характерных для аварийных режимов их работы с токовыми перегрузками, металлические жилы (оболочки) данных кабелей могут испытывать интенсивный локальный нагрев в зонах образования вдоль них узких "горячих" продольных участков. При этом температура нагрева в зонах "горячих" продольных участков проводов (кабелей) может существенно превышать температуру нагрева соседних с ними "холодных" продольных участков и достигать температуры плавления их основных проводниковых материалов – меди, алюминия и стали. Появление в экстремальных ситуациях на "горячих" продольных участках проводов (кабелей) таких высоких температур может приводить к их локальному электротермическому разрушению, возгоранию их резиновой, поливинилхлоридной, полиэтиленовой или бумажно-масляной изоляции и соответственно к возникновению локальных очагов пожара в зоне прокладки кабельных трасс. Для предотвращения возгорания на «горячих» участках кабеля необходимо провести дальнейшее исследование этого нового электрофизического эффекта, разработать или подобрать аппараты защиты для борьбы с последствиями указанного явления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аналіз масиву карток обліку пожеж в Україні за 12 місяців 2013 року – ДСНС України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.undicz.mns.gov.ua/content/statistics.html](http://www.undicz.mns.gov.ua/content/statistics.html).
2. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: монография в 2-х томах. Том 2., кн.2: Теория электрофизических эффектов и задач / Баранов М.И. //– Харьков. – 2010. – 407 с.
3. Баранов М.И. Усредненные характеристики волнового рас-

пределения дрейфующих электронов в металлическом проводнике с импульсным током проводимости большой плотности / Баранов М.И., Рудаков С.В. // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. - Харків: НТУ «ХП». – 2013. - № 60(1033). – С.12-20.

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

5. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости / Баранов М.И. // Электротехника.– 2005.– №7.– С.25–33.

6. Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределения электрического тока проводимости в проводнике / Баранов М.И. // Технічна електродинаміка.– 2007.– №1.– С.13–19.

7. Баранов М.И. Энергетический и частотный спектры свободных электронов проводника с электрическим током проводимости / Баранов М.И.//Электротехника.–2006.– №7.– С.29–34.

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

9. 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.

10. Баранов М.И. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. / Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С.81–85.

М.І. Баранов, С.В. Рудаков

#### **Пожежонебезпечна дія короткострокових імпульсних надструмів в електричних кабелях**

На підставі розрахункових та експериментальних даних показано, що при протіканні надструмів в силових електричних мережах короткостроковий локальний нагрів токонесучих частин ізольованих кабелів в зонах їх «горячих» подовжніх ділянках може стати умовою електротермічного руйнування, загоряння ізоляції та виникнення локальних осередків пожежі в місцях прокладання кабельних ліній.

**Ключові слова:** провідник, вільні електрони, імпульсний струм, електронні хвилі, характеристики подовжнього і радіального розподілу електронів.

M.I. Baranov, S.V. Rudakov

#### **Fire action short pulse over current in electric cables**

On the basis of the calculated and experimental data shows that during the flow of current regulation in the electric power circuits short-intensive local heating current-carrying parts insulated wires and cables in areas of their “hot” longitudinal sections may cause thermal destruction, fire insulation and sudden occurrence of local fires in places laying of cable lines.

**Keywords:** explorer, lone electrons, impulsive current, electronic waves, descriptions of the longitudinal and radial distributing of electrons.