

## ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ БОЛЬШИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ МОЛНИИ

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ «Молния» Национального технического университета

«Харьковский политехнический институт»

Украина, 61013, г. Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

Тел. (0572) 40-08-41, Факс (0572) 40-01-33, E-mail: nipkimolniya@kpi.kharkov.ua

*Приведено результати досліджень з перевірки при прямому ударі блискавки (ПУБ) електротермічної стійкості ізолюваних проводів і кабелів, що знаходяться під дією першої компоненти імпульсного струму блискавки з часовими параметрами 2/50 мкс. Визначено мінімально допустимі та критичні перерізи мідних та алюмінієвих жил (екранів) проводів (кабелів) з полівінілхлоридною, резиновою та поліетиленовою ізоляцією з умов їх електротермічної стійкості і електричного вибуху при ПУБ в залежності від амплитуди імпульсного струму блискавки 2/50 мкс. Отримано середні по перерізу жил (екранів) досліджуваних проводів (кабелів) чисельні значення гранично допустимої та критичної щільностей імпульсного струму блискавки 2/50 мкс.*

*Приведены результаты исследований по проверке при прямом ударе молнии (ПУМ) электротермической стойкости изолированных проводов и кабелей, испытывающих воздействие первой компоненты импульсного тока молнии с временными параметрами 2/50 мкс. Определены минимально допустимые и критические сечения для алюминиевых и медных жил (экранов) проводов (кабелей) с поливинилхлоридной, резиновой и полиэтиленовой изоляцией по условиям их электротермической стойкости и электрического взрыва при ПУМ в зависимости от амплитуды импульсного тока молнии 2/50 мкс. Получены усредненные по сечению жил (экранов) исследуемых проводов (кабелей) численные значения предельно допустимой и критической плотностей импульсного тока молнии 2/50 мкс.*

### ВВЕДЕНИЕ

При прямом ударе молнии (ПУМ) в технические объекты, размещенные в околоземной атмосфере, на земле или под землей, в последних возникает комплекс сложных электромагнитных, электротермических и электромеханических процессов, приводящих, как правило, к дестабилизации (сбою) в работе их основных устройств и систем жизнеобеспечения или к необратимым явлениям, вызывающим выход из строя объектов в целом с катастрофическими последствиями. Это прежде всего относится к летательным аппаратам (ЛА) и силовым электроэнергетическим объектам (ЭЭО) [1,2,5,7,18]. Для ЛА и ЭЭО и поныне актуальной остается проблема повышения степени их молниезащиты, для решения которой необходима как разработка и создание усовершенствованных защитных устройств от ПУМ, так и уточненной нормативно-технической документации, направленных в комплексе на обеспечение безопасности полетов ЛА, работы ЭЭО и обслуживающего персонала, предохранение объектов авиационно-космической техники и электроэнергетики от возможных возгораний, взрывов и разрушений, сопровождающих обычно ПУМ. При этом одной из важных задач, решаемой в рамках указанной проблемы, является проверка проводов, кабелей и шин ответственных электрических цепей радио- и электротехнического оборудования защищаемых от ПУМ объектов на электротермическую стойкость к воздействию больших импульсных токов (БИТ) молнии, характеризующихся амплитудами в десятки и сотни килоампер и длительностями в десятки (сотни) микросекунд [4,7,17,18]. Как известно, под электротермической стойкостью изолированных проводов и кабелей при ПУМ понимается способность последних противостоять действию температуры нагрева их проводниковых и изоляционных материалов, вызванной воздействием на них импульсного тока

молнии, без нарушения работоспособного состояния кабельно-проводниковой продукции в целом [3,4]. Заметим, что аналогичную задачу требуется решать при лабораторных и натурных испытаниях ЛА и ЭЭО на молниестойкость с помощью высоковольтных электрофизических установок (ВЭФУ), моделирующих прямые эффекты молнии [5,7,8], в случае когда генераторы импульсных напряжений и токов ВЭФУ с емкостными накопителями энергии (ЕНЭ) подключаются к испытываемым объектам изолированными проводами или кабелями. Знание электротермической стойкости проводов (кабелей) к импульсным высокоинтенсивным воздействиям при ПУМ позволяет на стадии разработки ЛА или ЭЭО правильно выбирать кабельно-проводниковую продукцию, устанавливаемую в опасные электрические цепи защищаемых объектов и повышать надежность их функционирования в условиях электрически активной земной атмосферы.

Известные расчетные методики, приведенные в [8,10,12], для проверки на электротермическую стойкость электрических аппаратов и проводников к аварийным токам короткого замыкания (КЗ) промышленной частоты 50 Гц и токам молнии позволяют выполнять только грубую оценку рассматриваемой стойкости проводов (кабелей) к ПУМ, при которой их импульсный нагрев оказывается существенно заниженным и не отражающим реального теплового состояния проводника и его изоляции при ПУМ [4].

Целью данной статьи является разработка уточненной инженерной методики для оценки при ПУМ электротермической стойкости и выбора минимально допустимых и критических сечений одно- и многожильных проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (экранами) и поливинилхлоридной (ПВХ), резинового (Р) и полиэтиленовой (ПЭ) изоляцией, испытывающих воздействие импульсного тока молнии.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Рассмотрим прямолинейный провод (кабель) с твердой изоляцией, по круглой немагнитной металлической жиле (экрану) которого в продольном направлении протекает импульсный ток молнии  $i_L(t)$ , приближенно описываемый во времени  $t$  следующим выражением:

$$i_L(t) = \beta_L I_m \sum_{k=1}^2 (-1)^{k+1} \cdot \exp(-\alpha_k t), \quad (1)$$

где  $I_m$  - амплитуда первой компоненты импульса тока молнии;  $\alpha_k$  - коэффициенты формы первой компоненты импульса тока молнии ( $\alpha_1 \approx 0,76/\tau_p$ ;  $\alpha_2 \approx 2,37/\tau_f$ );  $\tau_f$ ,  $\tau_p$  - соответственно длительность фронта и длительность первой компоненты импульса тока молнии, определяемые между уровнями 0,1-0,9 и на уровне 0,5 от его амплитуды;

$\beta_L = \left[ (\alpha_1/\alpha_2)^{\alpha_1/(\alpha_2-\alpha_1)} - (\alpha_1/\alpha_2)^{\alpha_2/(\alpha_2-\alpha_1)} \right]^{-1}$  - нормирующий коэффициент.

Следует отметить, что согласно результатам наземных натурных испытаний ЛА на молниестойкость [5] в соединительных электрических цепях их бортового оборудования наводимые импульсы напряжения (тока) имеют сложную форму, в которой можно выделить три основные составляющие: повторяющую по форме первую компоненту воздействующего на металлическую обшивку ЛА импульса тока молнии вида (1), ее производную и высокочастотную. Кроме того, результаты расчетов наведенных импульсных напряжений и токов в экранированных коаксиальных кабелях связи при ПУМ в их металлический экран, выполненные с учетом влияния нестационарного поверхностного эффекта в экране, свидетельствуют о том, что протекающие в этом случае по жиле и экрану, нагруженных на обоих концах кабеля на свое волновое сопротивление, импульсные токи практически повторяют аperiодическую форму тока молнии [17]. В связи с этим использование в дальнейших расчетах исходного выражения (1) представляется достаточно обоснованным и более того необходимым на этапе разработки практических рекомендаций по экспертной оценке при ПУМ электротермической стойкости и дальнейшему выбору на стадии проектирования ЛА и ЭЭО сечений изолированных проводов (кабелей), предназначенных для работы в их ответственных сетях и схемах испытаний ЛА и ЭЭО на молниестойкость. Заметим, что в настоящее время в странах СНГ при имитации в лабораторных условиях ПУМ и проведении испытаний радио- и электротехнического оборудования ЛА и ЭЭО на молниестойкость первая компонента импульсного тока молнии характеризуется следующими нормированными амплитудно-временными параметрами (АВП) [7,8]:  $I_m = 200 \text{кА}$ ;  $\tau_f/\tau_p = 2/50 \text{мкс}$ ;  $\alpha_1 = 1,529 \cdot 10^4 \text{с}^{-1}$ ;  $\alpha_2 = 1,188 \cdot 10^6 \text{с}^{-1}$ ;  $\beta_L = 1,072$ .

Примем, что для удельной электропроводности  $\gamma_i$  материала жилы ( $i=1$ ) или экрана ( $i=2$ ) провода (кабеля) справедлива следующая аналитическая зависимость [6]:

$$\gamma_i = \gamma_{0i} / (1 + \theta_i^*), \quad (2)$$

где  $\gamma_{0i}$  - удельная электропроводность материала жилы (экрана) провода (кабеля) до воздействия на него ПУМ при температуре окружающей среды  $\theta_0$ , равной  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  (для алюминия  $\gamma_{0i} = 3,61 \cdot 10^7 \text{См/м}$ ;

для меди  $\gamma_{0i} = 5,81 \cdot 10^7 \text{См/м}$  [6]);  $\theta_i^* = \theta_i / \theta_{bi}$ ;

$\theta_i = \theta_{ii} - \theta_0$  - превышение температуры материала жилы (экрана) провода (кабеля);  $\theta_{ii}$  - температура материала жилы (экрана) провода (кабеля) после воздействия на него ПУМ;  $\theta_{bi} = 1/C_{0i} \cdot \beta_{0i}$  - базисное превышение температуры материала жилы (экрана) провода (кабеля) (для алюминия  $\theta_{bi} = 172,4^\circ\text{C}$ ; для меди  $\theta_{bi} = 194,2^\circ\text{C}$  [6]);  $C_{0i} = d \cdot \overline{C_{0i}}$  - удельная теплоемкость, отнесенная к единице объема материала жилы (экрана) провода (кабеля) (для алюминия  $C_{0i} = 2,7 \cdot 10^6 \text{Дж/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ; для меди  $C_{0i} = 3,92 \cdot 10^6 \text{Дж/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$  [6]);  $d$  - плотность материала жилы (экрана) провода (кабеля);  $\overline{C_{0i}}$  - удельная теплоемкость, отнесенная к единице массы материала жилы (экрана) провода (кабеля);  $\beta_{0i} = \alpha_{0i} / C_{0i}$  - тепловой коэффициент удельной электропроводности материала жилы (экрана) провода (кабеля) (для алюминия  $\beta_{0i} = 2,14 \cdot 10^{-9} \text{м}^3/\text{Дж}$ ; для меди  $\beta_{0i} = 1,31 \cdot 10^{-9} \text{м}^3/\text{Дж}$  [6]);  $\alpha_{0i}$  - температурный коэффициент удельной электропроводности материала жилы (экрана) провода (кабеля).

Отметим, что согласно экспериментальным данным в интервале от  $0^\circ\text{C}$  до температуры плавления  $\theta_{im}$  материала жилы (экрана) провода (кабеля) соотношение (2) аппроксимирует температурную зависимость удельной электропроводности  $\gamma_i$  для алюминия и меди с погрешностью не более 5% [6]. Учитывая практически адиабатический характер протекающих при ПУМ в материале жилы (экрана) провода (кабеля) ЛА и ЭЭО электротермических процессов, влиянием теплоотдачи с поверхностей жилы (экрана) и их твердой изоляции и теплопроводности их проводниковых и изоляционных материалов на импульсный нагрев исследуемых проводов (кабелей) пренебрегаем [3,4].

## КРИТЕРИЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРИ ПУМ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ

Считаем, что при ПУМ электротермическая стойкость рассматриваемых проводов (кабелей) лимитируется их предельно допустимым кратковременным превышением температуры  $\theta_{ik}$ , зависящим от степени снижения механической прочности материала жилы (экрана) и тепловых условий работы изоляции проводов (кабелей) при импульсном кратковременном нагреве последних током молнии. Принимая, что значение  $\theta_{ik}$  соответствует известной предельно

допустимой кратковременной температуре  $\theta_{ikd}$  изолированных проводов (кабелей) при их кратковременном нагреве током КЗ промышленной частоты 50 Гц [12] в безразмерном виде получаем:

$$\theta_{ik}^* = \theta_{ikd}^* - \theta_0^*, \quad (3)$$

где  $\theta_{ik}^* = \theta_{ik} / \theta_{bi}$ ;  $\theta_{ikd}^* = \theta_{ikd} / \theta_{bi}$ ;  $\theta_0^* = \theta_0 / \theta_{bi}$ .

Согласно [12] значение предельно допустимой кратковременной температуры  $\theta_{ikd}$  для изолированных проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (экранами) и ПВХ и Р изоляцией, широко используемых в низко- и высоковольтных бортовых электрических цепях (БЭЦ) ЛА и силовых электрических цепях (СЭЦ) ЭЭО [1,11], составляет величину  $\theta_{ikd} = 150^\circ\text{C}$ .

Тогда из (3) при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  следует, что для указанных выше проводов (кабелей) с медными жилами  $\theta_{ik}^* = 0,67$ , а с алюминиевыми –  $\theta_{ik}^* = 0,75$ . Для изолированных проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (экранами) и ПЭ изоляцией ( $\theta_{ikd} = 120^\circ\text{C}$ ), широко применяемых в силовых разрядных цепях (СРЦ) ВЭФУ, приемно-передающих трактах антенно-фидерных устройств ЛА, кабельных линиях электропередачи (КЛЭП) и связи (КЛС) ЭЭО [8,11], нормированные значения предельно допустимых кратковременных превышений температуры  $\theta_{ik}^*$  при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  составляют соответственно  $\theta_{ik}^* = 0,51$  и  $0,58$ .

В качестве критерия, определяющего электротермическую стойкость изолированных проводов (кабелей) ЛА и ЭЭО к воздействию ПУМ, выбираем следующее условие:

$$\theta_i^* \leq \theta_{ik}^*. \quad (4)$$

Из (4) следует, что при известных значениях  $\theta_{ik}^*$  проверка изолированных проводов (кабелей) на электротермическую стойкость к воздействию БИТ молнии сводится к расчету безразмерного превышения температуры  $\theta_i^*$  материала их жил (экранов) за время действия ПУМ.

В [4] было показано, что при ПУМ задача о нахождении решения линейного неоднородного дифференциального уравнения для нормированного превышения температуры  $\theta_i^*$  в материале круглого сплошного (трубчатого) металлического провода с переменной удельной электропроводностью  $\gamma_i(\theta_i)$  при начальном условии вида  $\theta_i^*(0) = 0$  представляет собой задачу Коши, решение которой применительно к рассматриваемой расчетной электротепловой модели может быть записано в следующем виде:

$$\theta_i^* = \exp\left(\frac{2J_{ci}}{\mu_0\gamma_{0i}h_{ci}^2}\right) - 1, \quad (5)$$

где  $J_{ci} = \int_0^{\tau_p} \delta_{zi}^2(r,t) dt$  – интеграл тока при ПУМ для жилы (экрана) изолированного провода (кабеля);

$\delta_{zi}(r,t)$  – плотность аксиального тока молнии в жиле (экране) провода (кабеля);  $r$  – текущий радиус жилы (экрана) провода (кабеля);  $h_{ci} = (2/\mu_0\beta_{0i})^{0,5}$  – характеристическая напряженность импульсного азимутального магнитного поля тока молнии (для алюминия  $h_{ci} = 2,467 \cdot 10^7 \text{ А/м}$ ; для меди  $h_{ci} = 3,422 \cdot 10^7 \text{ А/м}$  [6]);  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная.

Для сравнения с вышеуказанным решением (5) приведем решение одномерного теплового уравнения (6) из [4] при постоянной удельной электропроводности  $\gamma_i = \gamma_{0i}$  материала жилы (экрана) изолированного провода (кабеля), испытывающего воздействие ПУМ:

$$\theta_i^* = \frac{2J_{ci}}{\mu_0\gamma_{0i}h_{ci}^2}. \quad (6)$$

На рис.1 приведены нормированные зависимости превышения поверхностной температуры  $\theta_i^*$  для изолированных проводов (кабелей) с медными (кривые 2,4) и алюминиевыми (кривые 1,3) сплошными жилами (экранами) от интеграла тока молнии  $J_{ci}$ , рассчитанные соответственно по формулам (5) и (6). Пунктирными прямыми 5 и 6 на рис.1 изображены безразмерные значения предельно допустимых кратковременных превышений поверхностной температуры  $\theta_i^* = \theta_{ik}^*$  для медных жил (экранов) проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭ изоляцией соответственно, а пунктирными прямыми 7 и 8 – безразмерные температуры плавления  $\theta_{im}^* = (\theta_{im} - \theta_0) / \theta_{bi}$  для алюминия ( $\theta_{im} = 658^\circ\text{C}$ ) и меди ( $\theta_{im} = 1083^\circ\text{C}$ ) соответственно [6].

Из принятой зависимости (2) для  $\gamma_i$  от  $\theta_i^*$  следует, что при достижении точки плавления для алюминиевой жилы (экрана) провода или кабеля будет выполняться равенство  $\gamma_{0i} / \gamma_i = 4,7$ , а для медной –  $\gamma_{0i} / \gamma_i = 6,47$ . Пунктирные прямые 9 и 10 на рис.1 отражают предельные значения интеграла тока  $J_{ci} = J_{si}$ , при которых начинаются фазовые переходы в материалах жилы (экрана) провода (кабеля). Отметим, что для алюминия  $J_{si} = 0,32 \cdot 10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$ , а для меди  $J_{si} = 0,89 \cdot 10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$  [6].

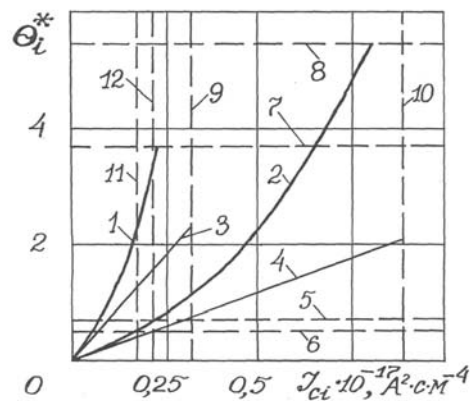


Рис.1

Из кривых 1-4 на рис.1 видно, что расчеты импульсного нагрева при ПУМ жил (экранов) изолиро-

ванных проводов и кабелей по формуле (6), фактически используемой в известных работах [8,10] по молниестойкости и не учитывающей влияние безразмерного превышения температуры  $\theta_i^*$  на значения удельной электропроводимости  $\gamma_i$  их материала, могут приводить к значительным погрешностям (десяткам и сотням процентов) при определении  $\theta_i^*$ .

Для интеграла тока  $J_{ci}$  электротермически стойких к ПУМ изолированных проводов и кабелей должно выполняться следующее условие:

$$J_{ci} \leq J_{cik}, \quad (7)$$

где  $J_{cik}$  – интеграл тока при ПУМ для жилы (экрана) провода (кабеля), безразмерное превышение поверхностной температуры материала которых равно  $\theta_i^* = \theta_{ik}^*$ .

Из (5) следует, что для изолированных проводов и кабелей с ПВХ и Р изоляцией и сплошных медных жил (экранов)  $J_{cik} = 2,19 \cdot 10^{16} \text{A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$ , а для алюминиевых –  $J_{cik} = 0,77 \cdot 10^{16} \text{A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$ . Для изолированных проводов и кабелей с ПЭ изоляцией и сплошными медными жилами (экранами)  $J_{cik} = 1,76 \cdot 10^{16} \text{A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$ , а с алюминиевыми –  $J_{cik} = 0,63 \cdot 10^{16} \text{A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$ . Пунктирные прямые 11 и 12 на рис.1 как раз и соответствуют рассматриваемым значениям интеграла тока  $J_{cik}$  для исследуемых проводов и кабелей с ПЭ, ПВХ и Р изоляцией и сплошными медными жилами (экранами).

Из кривых на рис.1 видно, что для того, чтобы при ПУМ материал жилы (экрана) изолированного провода или кабеля оставался в твердом состоянии необходимо выполнение следующего условия:

$$J_{ci} \leq J_{si}. \quad (8)$$

Такой подход позволил в свое время автору выполнить расчетные оценки при ПУМ предельно допустимых «сверху» кратковременных токовых нагрузок для круглых неизолированных алюминиевых и медных проводов [19], которые могут быть использованы для выбора токоведущих частей силовых цепей моделирующих молнию ВЭФУ с крайне ограниченным сроком службы.

Выполним приближенную оценку превышения поверхностной температуры  $\theta_{ip}^*$  для расщепленной жилы одно- и многожильных изолированных проводов (кабелей) с учетом данных расчета по формуле (5) превышения поверхностной температуры  $\theta_i^*$  для круглой сплошной жилы провода (кабеля) эквивалентного поперечного сечения  $S_y$ . Рассмотрим случай резкого скин-эффекта, когда круглая жила одно- и многожильных изолированных проводов (кабелей) выполнена с высоким коэффициентом заполнения металлом поперечного сечения, а глубина проникновения  $\Delta_i$  магнитного поля тока молнии в материал жилы существенно меньше ее поперечных размеров, т.е.  $b/\Delta_i = b(\pi f_k \mu_0 \gamma_{oi})^{0,5} \gg 1$ , где  $f_k \approx 0,4/\tau_f$  [4,6] – граничная частота в спектре импульса тока молнии

(при длительности фронта импульса тока  $\tau_f = 2 \text{мкс}$  значение частоты равно  $f_k = 200 \text{кГц}$ , а глубина проникновения поля в медь составляет величину  $\Delta_i = 0,147 \text{мм}$ );  $b$  – радиус жилы провода (кабеля).

Тогда в соответствии с формулой (4.38) из [6] отношение безразмерных превышений поверхностных температур для сплошной и расщепленной немагнитных жил круглого поперечного сечения из идентичного материала одно- и многожильных изолированных проводов (кабелей) ЛА или ЭЭО с импульсным током молнии в адиабатическом приближении может быть записано в виде:

$$\frac{\theta_i^*}{\theta_{ip}^*} = \frac{H_{si}^2(t)}{H_{sip}^2(t)}, \quad (9)$$

где  $H_{si}(t)$ ,  $H_{sip}(t)$  – напряженности азимутального импульсного магнитного поля тока молнии соответственно на наружной поверхности сплошной и расщепленной на отдельные проволоки жилы провода (кабеля).

Учитывая (9) и эквивалентность импульсных токовых нагрузок при ПУМ для сплошной и расщепленной жил, для нормированного превышения поверхностной температуры расщепленной жилы одно- и многожильных изолированных проводов (кабелей) окончательно находим:

$$\theta_{ip}^* = \theta_i^* \cdot \frac{nd_p^2}{D_p^2}, \quad (10)$$

где  $n, d_p$  – соответственно число и диаметр проволок в расщепленной жиле;  $D_p$  – наружный диаметр расщепленной жилы;  $\theta_i^*$  – превышение поверхностной температуры для круглой сплошной жилы эквивалентного поперечного сечения  $S_y = n S_n$ , определенное по формуле (5);  $S_n = \pi d_p^2 / 4$  – поперечное сечение проволоки в расщепленной жиле.

Расчеты  $\theta_{ip}^*$  по формуле (10) для расщепленной медной жилы, например, радиочастотного кабеля РК 50-9-11, с использованием параметров ее расщепления, приведенных в [11], свидетельствуют о том, что поверхностная температура расщепленной жилы рассматриваемого кабеля будет примерно на 23% меньше, чем поверхностная температура для его сплошной круглой жилы эквивалентного сечения  $S_y$ .

Для проверки достоверности полученных результатов расчета импульсного нагрева материала жилы (экрана) изолированного провода (кабеля) сравним значения безразмерного превышения поверхностной температуры  $\theta_i^*$  для сплошной круглой жилы изолированного провода (кабеля), рассчитанные по предлагаемой методике и с помощью известной формулы (10.85) из [9]. Известная аналитическая зависимость для приближенного расчета в установившемся режиме превышения поверхностной температуры скин-слоя массивного круглого соленоида (сплошно-витка) за первый полупериод разрядного тока ЕНЭ

ВЭФУ в принятых нами обозначениях применительно к круглой сплошной жиле провода (кабеля) с аperiодическим импульсом тока молнии амплитудой  $I_m$  имеет вид:

$$\theta_i^* = \frac{I_m^2}{4\pi b^2 h_{ci}^2} \quad (11)$$

Заметим, что область применения формулы (11) ограничена таким нагревом, когда изменение удельной электропроводности  $\gamma_i$  материала проводника из-за его нагрева токовым импульсом невелико [9]. Выполняя эти ограничения, для сплошной медной жилы  $\varnothing 5\text{мм}$  радиочастотного кабеля РК 75-33-17 [11] при  $I_m = 100$  и  $200\text{кА}$  по известной формуле (11) получаем, что превышения поверхностной температуры жилы при рассматриваемых токовых воздействиях будут соответственно равны  $\theta_i^* = 0,108$  ( $21,1^\circ\text{C}$ ) и  $0,434$  ( $84,4^\circ\text{C}$ ). Расчеты по предложенной формуле (5) для данного случая показывают, что превышения поверхностной температуры жилы принимают соответственно значения равные  $\theta_i^* = 0,095$  ( $18,6^\circ\text{C}$ ) и  $0,308$  ( $60^\circ\text{C}$ ). Расхождения примерно равные 11 и 28% между сопоставляемыми значениями превышения поверхностной температуры  $\theta_i^*$  в исследуемой жиле могут быть объяснены принятыми в [9] допущениями (ограничениями) и приближенным характером формулы (11), при которых не учитывается процесс перехода части тока с приповерхностных более нагретых слоев жилы в ее более глубокие и менее нагретые слои. Данный процесс перераспределения импульсного тока будет приводить к определенному снижению поверхностной температуры жилы и соответственно к уменьшению указанных расхождений.

Из (4)–(6), (10) и представленных на рис.1 зависимостей видно, что расчетная оценка электротермической стойкости изолированных проводов (кабелей) ЛА и ЭЭО к воздействию БИТ молнии в итоге сводится к определению значений интеграла тока  $J_{ci}$  для их проводящих жил (экранов) с заданными геометрическими и электрофизическими характеристиками.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛА ТОКА ПРИ ПРЯМОМ УДАРЕ МОЛНИИ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ

На рис.2 приведены зависимости интеграла тока  $J_{ci}$  для экранированного провода низкого напряжения БПВЛЭ с медной жилой  $\varnothing 7,35\text{мм}$  (кривая 1) и медным экраном (кривая 4) и ПВХ изоляцией, используемого в БЭЦ авиационной техники [11], от значений амплитуды  $I_m$  импульса тока молнии  $2/50$  мкс. Там же представлены значения интеграла тока  $J_{ci}$  для радиочастотных кабелей типа РК со сплошной ПЭ изоляцией и медными жилами (экранами) [11], применяемых в СРЦ ВЭФУ, БЭЦ ЛА и КЛС ЭЭО: РК 75-33-17 (для жилы, кривая 2), РК 50-13-15 (для жилы, кривая 3), РК 50-9-11 (для экрана, кривая 5) и РК 75-

13-17 (для жилы, кривая 6). Расчеты интеграла тока  $J_{ci}$  для указанных кабелей и провода БПВЛЭ были выполнены по формулам (5) и (10) применительно к поверхностям скин-слоев их жил (экранов) с учетом результатов численного решения нестационарной нелинейной электротепловой задачи для немагнитного сплошного (трубчатого) провода, испытывающего воздействие ПУМ с токовым импульсом  $2/50$  мкс [3]. Пунктирные прямые 7 и 8 на рис.2 соответствуют значениям интеграла тока  $J_{cik}$  для проводов (кабелей) с медными жилами (экранами) и ПЭ (кривая 7), ПВХ и Р (кривая 8) изоляцией. Пунктирная прямая 9 отражает предельное значение интеграла тока  $J_{si}$  для медных жил (экранов). Позициями I, II, III на рис.2 и 3 обозначены соответственно жила, экран и изоляция провода (кабеля).

Приведенные на рис.2 зависимости позволяют при известных значениях амплитуды  $I_m$  воздействующего импульса тока молнии определить расчетные значения интеграла тока  $J_{ci}$  для рассматриваемых кабелей РК и провода БПВЛЭ. Далее зная  $J_{ci}$ , по кривой 2 на рис.1, формулам (5) и (10) находим при ПУМ безразмерные превышения поверхностной температуры  $\theta_i^*$  и  $\theta_{ip}^*$  для сплошной или расщепленной жилы (экрана) провода (кабеля) и для проверки их на электротермическую стойкость сопоставляем согласно (4) полученные значения  $\theta_i^*$  и  $\theta_{ip}^*$  с заданным безразмерным предельно допустимым кратковременным превышением температуры  $\theta_{ik}^*$ .

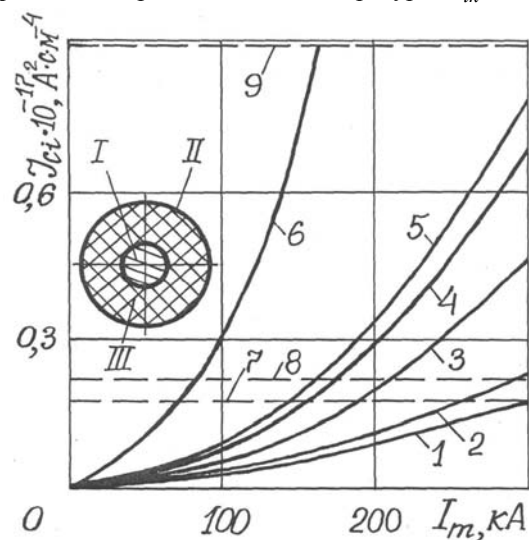


Рис.2

Кривые 1-8 на рис.2 позволяют также выполнить расчетные оценки при ПУМ предельно допустимых «снизу» кратковременных токовых нагрузок  $I_{mk}$  для исследуемых кабелей РК и провода БПВЛЭ с медными жилами (экранами). При этом токовые нагрузки  $I_{mk}$  соответствуют на рис.2 точкам пересечения сплошных кривых 1-6 и пунктирных прямых 7, 8. Так, согласно кривой 4 на рис.2 для медного экрана прово-

да БПВЛЭ с внешним Ø11,2мм [11] при ПУМ предельно допустимой «снизу» кратковременной токовой нагрузкой  $I_{mk}$  является грозовой импульс тока 2/50 мкс амплитудой равной  $I_m = I_{mk} = 174$ кА. Максимальное значение плотности тока молнии  $\delta_{z2}$  при этом вблизи внутренней поверхности экрана провода БПВЛЭ составляет величину  $0,35 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup>. Для сплошной медной жилы Ø2мм кабеля РК 75-13-17 [11] (кривая 6 на рис.2) при ПУМ рассматриваемая токовая нагрузка равна  $I_{mk} = 71$ кА. В этом случае вблизи наружной поверхности медной жилы амплитуда плотности тока молнии  $\delta_{z1}$  достигает значения около  $0,58 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup>, что соответствует скорости ввода плотности тепловой энергии в медную жилу примерно равной  $0,69 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>·с.

Для сравнения полученных численных данных относительно плотности тока молнии  $\delta_{zi}$  с известными отметим, что в изолированных проводах и кабелях при их продолжительной работе в электрических цепях ЭЭО плотность тока промышленной частоты 50Гц составляет до  $10^7$  А/м<sup>2</sup>, для сетевого плавкого предохранителя в режиме плавления и медного провода при КЗ в промсети для кратковременного режима работы – до  $10^9$  А/м<sup>2</sup>, а для электрически взрываемого синусоидальным затухающим током в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ медного провода – до  $10^{11}$  А/м<sup>2</sup> [14-16, 20].

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО И КРИТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЙ ДЛЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ ПРИ ПУМ

Примем, что до воздействия ПУМ изолированные провода (кабели) были электрически полностью загружены и максимальная температура их жил (экранов) была равна длительно допустимой температуре  $\theta_{id}$ . Известно, что для рассматриваемых проводов и кабелей ЛА и ЭЭО с ПВХ, Р и ПЭ изоляцией  $\theta_{id} = 65^\circ\text{C}$  [12]. Считая, что при воздействии первой компоненты импульса тока молнии  $i_L(t)$  жила (экран) провода (кабеля) нагревается до предельно допустимой кратковременной температуры  $\theta_{ikd}$  для минимально допустимого поперечного сечения  $S_{im}$  жилы (экрана) изолированных проводов (кабелей) по условиям их электротермической стойкости к воздействию БИТ молнии получаем:

$$S_{im} = \frac{J_d^{0,5}}{C_{im}}, \quad (12)$$

где  $J_d = \int_0^{\tau_{p1}} i_L^2(t) dt$  – интеграл действия импульсного тока молнии;  $C_{im} = (J_{cik} - J_{cid})^{0,5}$ ;  $J_{cid}$  – интеграл тока молнии для проводов (кабелей), превышение поверхностной температуры материала жилы (экрана) которых составляет  $\theta_i = \theta_{id} - \theta_0$ .

Из расчетов по формуле (5) при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  значений интеграла тока  $J_{cid}$  следует, что для проводов (кабелей) с ПВХ, Р и ПЭ изоляцией и алюминиевых

сплошных жил (экранов)  $J_{cid} = 0,32 \cdot 10^{16}$  А<sup>2</sup>·с·м<sup>-4</sup>, а для медных –  $J_{cid} = 0,88 \cdot 10^{16}$  А<sup>2</sup>·с·м<sup>-4</sup>. В табл. 1 указаны численные значения коэффициентов  $C_{im}$  для проводов (кабелей) со сплошными медными и алюминиевыми жилами (экранами) и ПВХ, Р и ПЭ изоляцией при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ . Из анализа полученных значений для  $C_{im}$  и их сравнения с известными в области молниезащиты коэффициентами  $C_{ii}$  для голых проводов [4] следует, что для сплошных медных жил (экранов) проводов (кабелей) разница между рассматриваемыми коэффициентами достигает 40%, а для алюминиевых – 30%.

Таблица 1

| Наименование изоляции в проводах (кабелях) | Наименование материала жил (экранов) проводов (кабелей) | Значение коэффициента $C_{im}$ , $10^8$ А·с <sup>1/2</sup> ·м <sup>-2</sup> | Значение коэффициента $D_{ik}$ , $10^8$ А·с <sup>1/2</sup> ·м <sup>-2</sup> |
|--|---|---|---|
| ПВХ, Р                                     | Медь  | 1,14  | 4,31  |
|  | Алюминий  | 0,67  | 3,25  |
| ПЭ   | Медь  | 0,93  | 4,31  |
|  | Алюминий  | 0,55  | 3,25  |

В табл. 2 с достаточной для практических целей точностью приведены приближенные численные данные для интеграла действия  $J_d$  импульсного тока молнии 2/50 мкс в зависимости от его амплитуды  $I_m$ . При этом в расчетном выражении для  $J_d$  принималось, что  $\tau_{p1} = 500$  мкс. Точные численные данные для интеграла действия  $J_d$  импульсного тока молнии 2/50 мкс могут быть вычислены по формуле (15) из [4].

Таблица 2

| Амплитудное значение импульса тока молнии $I_m$ , кА | Значение интеграла действия импульса тока молнии $J_d$ , А <sup>2</sup> ·с |
|--|--|
| 1,0  | $0,361 \cdot 10^2$   |
| 5,0  | $9,04 \cdot 10^2$  |
| 10,0   | $3,61 \cdot 10^3$  |
| 20,0   | $1,45 \cdot 10^4$  |
| 30,0   | $3,25 \cdot 10^4$  |
| 50,0   | $9,04 \cdot 10^4$  |
| 70,0   | $1,77 \cdot 10^5$  |
| 100,0  | $3,61 \cdot 10^5$  |
| 150,0  | $8,13 \cdot 10^5$  |
| 200,0  | $1,45 \cdot 10^6$  |
| 250,0  | $2,26 \cdot 10^6$  |
| 300,0  | $3,25 \cdot 10^6$  |

На рис.3 изображены рассчитанные при ПУМ по формуле (12) зависимости для минимально допусти-

мых сечений  $S_{im}$  изолированных проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭ изоляцией соответственно с медными (сплошные кривые 1,2) и алюминиевыми (сплошные кривые 3,4) сплошными круглыми жилами (экранами) от амплитуды  $I_m$  импульса тока молнии 2/50 мкс. Пунктирные прямые 1-4 на рис.3 отражают рассматриваемые зависимости  $S_{im}$  в функции от амплитуды  $I_m$  при отсутствии первоначальной токовой загрузки в проводах (кабелях), т.е. при  $J_{cid}=0$ . Из данных рис.3 легко определяются усредненные по сечению  $S_{im}$  сплошных жил (экранов) изолированных проводов (кабелей) предельно допустимые амплитудные значения плотности  $\delta_{zcm} = I_m / S_{im}$  импульсного тока молнии 2/50 мкс.

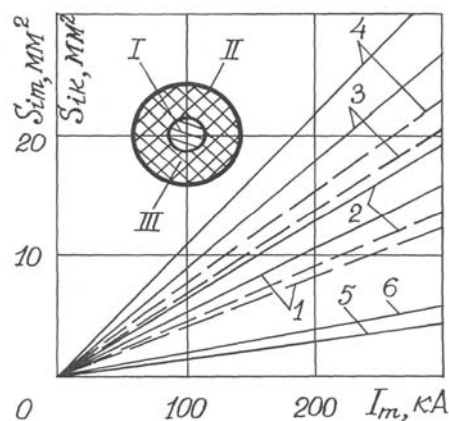


Рис. 3

Отметим, что вносимая в этом случае погрешность в определение при ПУМ значений  $\delta_{zcm}$  для медных жил (экранов) при  $S_{im} \leq 5 \text{ мм}^2$  и алюминиевых

жил (экранов) при  $S_{im} \leq 7 \text{ мм}^2$  не превышает 1%. Это подтверждается результатами теоретических исследований автора по установлению для грозового импульса тока вида (1) границ применимости расчетной электротепловой модели с равномерным распределением импульсного аксиального тока по поперечному сечению круглого цилиндрического проводника [13].

В табл. 3 приведены численные значения  $\delta_{zcm}$  для рассматриваемых проводниковых и изоляционных материалов проводов (кабелей). Полученные значения для предельно допустимой плотности  $\delta_{zcm}$  импульсного тока молнии в изолированных проводах и кабелях ЛА и ЭЭО с ПЭ и ПВХ, Р изоляцией оказываются для сплошных медных жил (экранов) соответственно на 39 и 27%, а для алюминиевых — на 31 и 16% меньше соответствующих известных для ПУМ предельно допустимых значений плотности тока молнии  $\delta_{zid}$  в неизолированных проводах [4].

Исходя из условия электрического взрыва (ЭВ) проводника [6], для критического поперечного сечения  $S_{ik}$  жилы (экрана) изолированных проводов (кабелей) при ПУМ получаем:

$$S_{ik} = \frac{J_d^{0,5}}{D_{ik}}, \quad (13)$$

где  $D_{ik} = (J_{vi} - J_{cid})^{0,5}$  — коэффициент, численные значения которого для исследуемых проводов (кабелей) при  $\theta_0 = 20^\circ \text{C}$  приведены в табл. 1;  $J_{vi}$  — критическое значение интеграла тока  $J_{ci}$  (для алюминия  $J_{vi} = 1,09 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$ , а для меди  $J_{vi} = 1,95 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$  [6]).

Таблица 3

| Наименование изоляции в проводах (кабелях) | Наименование материала жил (экранов) проводов (кабелей) | Амплитудное значение плотности импульсного тока молнии 2/50 мкс в сплошных жилах (экранах) изолированных проводов и кабелей ЛА и ЭЭО |   |
|--|---|--|---|
|  |   | Предельно допустимое $\delta_{zcm}$ , кА/мм <sup>2</sup>   | Критическое $\delta_{zik}$ , кА/мм <sup>2</sup> |
| ПВХ, Р                                     | Медь  | 19   | 73  |
|  | Алюминий  | 11   | 53  |
| ПЭ   | Медь  | 16   | 73  |
|  | Алюминий  | 9  | 53  |

На рис.3 прямые 5 и 6 отражают рассчитанные по формуле (13) зависимости для критических сечений  $S_{ik}$  исследуемых проводов (кабелей) соответственно со сплошными медными и алюминиевыми жилами (экранами) от амплитуды  $I_m$  тока молнии. Из (13) и представленных на рис.3 результатов расчета  $S_{ik}$  следует, что при протекании по изолированным проводам (кабелям) первой компоненты грозового импульса тока 2/50 мкс амплитудой  $I_m = 200 \text{ кА}$  для алюминиевых жил (экранов) явление абляции [3] и их ЭВ [6] будут наблюдаться при  $S_{ik} \leq 3,7 \text{ мм}^2$  (прямая 6), а для медных (прямая 5) — при  $S_{ik} \leq 2,8 \text{ мм}^2$ . Заметим, что при абля-

ции, характеризующейся расплавлением и испарением поверхностного слоя проводника, и для электрически взрывающейся при ПУМ жилы (экрана) провода или кабеля достигается температура кипения и парообразное состояние их металла. В этом случае для меди  $\gamma_{0i} / \gamma_i = 15,7$ , а для алюминия  $\gamma_{0i} / \gamma_i = 10,8$ . Согласно прямой 5 на рис.3 явление ЭВ сплошной медной жилы  $\emptyset 1,13 \text{ мм}^2$  радиочастотного кабеля РК 75-7-15 или расщепленной медной жилы сечением  $1 \text{ мм}^2$  провода БПВЛЭ внешним  $\emptyset 3,8 \text{ мм}$  [11], испытывающих воздействие БИТ молнии, будет наблюдаться примерно при амплитуде  $I_m = 73 \text{ кА}$  первой компоненты импульсного тока молнии с временными параметрами 2/50 мкс.

На основании анализа полученных результатов установлено, что при абляции и ЭВ металлических жил (экранов) изолированных проводов (кабелей) ЛА и ЭЭО, вызванных воздействием ПУМ с рассматриваемыми АВП, усредненные по сечению  $S_{ik}$  амплитудные значения критической плотности  $\delta_{zik} = I_m / S_{ik}$  импульсного тока молнии 2/50 мкс для медных жил (экранов) составляют  $\delta_{zik} \geq 73 \text{ кА/мм}^2$ , а для алюминиевых –  $\delta_{zik} \geq 53 \text{ кА/мм}^2$ . Из приведенных в табл. 3 данных видно, что при ПУМ отношение критических плотностей  $\delta_{zik}$  кратковременных импульсных токовых нагрузок  $i_L(t)$  в медных и алюминиевых жилах (экранах) проводов и кабелей численно равно примерно 1,37, что весьма близко к известному соотношению между плотностями тока в медных и алюминиевых жилах (экранах) при длительно допустимых токовых нагрузках промышленной частоты 50 Гц в проводах (кабелях) ЭЭО с ПВХ, Р и ПЭ изоляцией, численно равному в среднем 1,33 [11].

### ВЫВОДЫ

1. Предложена уточненная инженерная методика по проверке на электротермическую стойкость изолированных одно- и многожильных проводов и кабелей ЛА и ЭЭО к воздействию ПУМ, сопровождающегося протеканием по металлическим жилам и экранам проводов (кабелей) БИТ молнии микросекундной длительности.

2. Определены минимально допустимые  $S_{im}$  и критические  $S_{ik}$  поперечные сечения для алюминиевых и медных жил (экранов) проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭ изоляцией по условиям их электротермической стойкости и электрического взрыва при ПУМ в зависимости от амплитуды  $I_m$  импульсного тока молнии с временными параметрами 2/50 мкс.

3. Показано, что при ПУМ усредненные предельно допустимые амплитудные значения плотности  $\delta_{zcm}$  импульсного тока молнии 2/50 мкс в проводах и кабелях с ПВХ и Р изоляцией для сплошных медных жил (экранов) составляют не более  $19 \text{ кА/мм}^2$ , для алюминиевых – не более  $11 \text{ кА/мм}^2$ , а с ПЭ изоляцией соответственно не более 16 и  $9 \text{ кА/мм}^2$ .

4. Установлено, что при явлении абляции и электрического взрыва при ПУМ сплошных металлических жил (экранов) изолированных проводов и кабелей усредненные критические амплитудные значения плотности  $\delta_{zik}$  импульсного тока молнии 2/50 мкс для медных жил (экранов) составляют не менее  $73 \text{ кА/мм}^2$ , а для алюминиевых – не менее  $53 \text{ кА/мм}^2$ .

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Авакян Г.О., Бабинов М.Б., Борисов Р.К., Ларионов В.П. Воздействие молнии на бортовое оборудование летательных аппаратов// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.-1990.-№5.-С.101-107.  
[2] Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты.-Л.: Гидрометеоиздат, 1978.-223с.

[3] Баранов М.И., Бондина Н.Н. Нестационарные электромагнитные и тепловые процессы в цилиндрических проводниках при воздействии на них тока молнии// Электричество.-1992.-№10.-С.9-15.  
[4] Баранов М.И. Термическая стойкость неизолированных проводов при прямом ударе молнии// Технічна електродинаміка.-1997.-№6.-С.9-15.  
[5] Борисов Р.К., Григорьев О.А., Ларионов В.П. Методы испытания бортового оборудования летательных аппаратов на молниестойкость// Электричество.-1993.-№7.-С.21-27.  
[6] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.-М.: Мир, 1972.-391с.  
[7] Колушко Г.М., Кравченко В.И., Ларионов В.П., Борисов Р.К., Прохоров Е.Н. Методы испытания радиоэлектронного и электротехнического оборудования на молниестойкость// Известия вузов СНГ. Энергетика.-№9-10.-1992.-С.45-50.  
[8] Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств.-М.: Радио и связь, 1991.-264с.  
[9] Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ Под ред. В.С. Комелькова.-М.: Атомиздат, 1970.-472с.  
[10] Техника высоких напряжений/ Под общей ред. Д.В. Раезвига.-М.: Энергия, 1976.-488с.  
[11] Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник/ Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева: под ред. Н.И. Белоруссова. М.: Энергоатомиздат, 1988.-536с.  
[12] Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии/ Под ред. И.Н. Орлова и др.- М.: Энергоатомиздат, т.3, кн. 1, 1988.-880с.  
[13] Баранов М.И. Сравнение двух моделей для электротепловых расчетов цилиндрических проводников при воздействии на них больших импульсных токов// Технічна електродинаміка.-1999.-№3.-С.14-19.  
[14] Лебедев С.В. О механизме электрического взрыва металла// Теплофизика высоких температур.-1980.-т.18.-№2.-С.273-278.  
[15] Герасимов Л.С., Икрянников В.И. Температурная неустойчивость металлического проводника при высоких плотностях тока// Электричество.-1993.-№8.-С.54-60.  
[16] Баранов М.И., Бондина Н.Н., Бочаров В.А. Моделирование нелинейной электротепловой задачи для цилиндрических изотропных токопроводов электрофизических установок при получении больших импульсных токов// Технічна електродинаміка.-1998.-№4.-С.19-22.  
[17] Баранов М.И., Бондина Н.Н., Кравченко В.И. Расчет наведенных напряжений и токов в кабелях связи при прямом ударе молнии в их оболочку// Технічна електродинаміка.-2000.-№1.-С.14-18.  
[18] Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards// Proceeding of the IEEE.-1988.-Vol. 76.-№12.-p.1548-1565.  
[19] Varanov M.I. Estimation of ultimate current loadings for cylindric conductors being influenced by the lightning current// Proceeding of the 9<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering. Graz, Austria, 1995.-Vol.6.-p.6805-1-6805-4.  
[20] Баранов М.И., Бондина Н.Н., Даценко В.П. Математическое моделирование нестационарной нелинейной электротепловой задачи для цилиндрических токопроводов силовых электроустановок при коротком замыкании// Технічна електродинаміка.-2002.-№6.-С.8-12.

Поступила 25.01.03