

М.И. Баранов

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ В ЦЕПЯХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИЛЬНОТОЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНИКИ

Надані результати розробленого електротехнічного підходу до розрахункового вибору за умовою електричного вибуху (ЕВ) струмопровідних частин кабельно-провідникової продукції критичних перерізів S_{CCI} неізолюваних дротів, а також ізолюваних дротів і кабелів з полівінілхлоридною (ПВХ), гумовою (Г) і поліетиленовою (ПЕТ) ізоляцією з мідними (алюмінієвими) жилами (оболочками), по яких в колах високовольтної імпульсної техніки (ВСИТ) протікає імпульсний аксіальний струм $i_p(t)$ з довільними амплітудно-часовими параметрами (АЧП). На підставі цього підходу продемонстровані результати вибору критичних перерізів S_{CCI} для вказаних електричних дротів (кабелів) силових кіл ВСИТ з імпульсним струмом, АЧП якого з амплітудами $I_{mp}=(0,1-1000)$ кА змінюються по аперіодичному закону або закону затухаючої синусоїди в нано-, мікро- і мілісекундному часових діапазонах. Представлені результати розрахункової оцінки критичних амплітуд щільностей δ_{CCI} імпульсів струму $i_p(t)$ цих часових форм у вказаних електричних дротах і кабелях кіл ВСИТ. Виконана експериментальна перевірка працездатності запропонованих розрахункових співвідношень для вибору перерізів S_{CCI} і щільностей δ_{CCI} струму в дротах (кабелях) при їх ЕВ. Отримані результати сприятимуть забезпеченню електротермічної стійкості електричних неізолюваних дротів, а також ізолюваних дротів і кабелів зі ПВХ, Г і ПЕТ ізоляцією, які широко застосовуються у силових колах ВСИТ. Бібл. 15, табл. 7, рис. 6.

Ключові слова: високовольтна сильнострумна імпульсна техніка, електричні дроти і кабелі, розрахунковий вибір критичних перерізів дротів і кабелів в колах імпульсної техніки, експеримент.

Приведены результаты разработанного электротехнического подхода к расчетному выбору по условию электрического взрыва (ЭВ) токонесущих частей кабельно-проводниковой продукции критических сечений S_{CCI} неизолированных проводов, а также изолированных проводов и кабелей с поливинилхлоридной (ПВХ), резиновой (Р) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), по которым в цепях высоковольтной сильноточной импульсной техники (ВСИТ) протекает импульсный аксиальный ток $i_p(t)$ с произвольными амплитудно-временными параметрами (АВП). На основании этого подхода продемонстрированы результаты выбора критических сечений S_{CCI} для указанных электрических проводов (кабелей) силовых цепей ВСИТ с импульсным током, АВП которого с амплитудами $I_{mp}=(0,1-1000)$ кА изменяются по аперіодическому закону или закону затухающей синусоиды в нано-, микро- и миллисекундному временных диапазонах. Представлены результаты расчетной оценки критических амплитуд плотностей δ_{CCI} импульсов тока $i_p(t)$ рассматриваемых временных форм в указанных электрических проводах и кабелях цепей ВСИТ. Выполнена экспериментальная проверка работоспособности предлагаемых расчетных соотношений для выбора сечений S_{CCI} и плотностей δ_{CCI} тока в проводах (кабелях) при их ЭВ. Полученные данные будут способствовать обеспечению электротермической стойкости электрических неизолированных проводов, а также проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, широко применяемых в силовых цепях ВСИТ. Библ. 15, табл. 7, рис. 6.

Ключевые слова: высоковольтная сильноточная импульсная техника, электрические провода и кабели, расчетный выбор критических сечений проводов и кабелей в цепях импульсной техники, эксперимент.

Введение. На практике при разработке, создании и эксплуатации мощных электроустановок в области высоковольтной сильноточной импульсной техники (ВСИТ) специалистам необходимо уметь определять критические поперечные сечения S_{CCI} применяемых в их цепях электрических проводов и кабелей, содержащих металлические жилы ($i=1$) и оболочки ($i=2$). Под критическими сечениями S_{CCI} проводов (кабелей) понимаются их такие поперечные сечения, которые не в состоянии выдерживать воздействующие на них токовые нагрузки с теми или иными амплитудно-временными параметрами (АВП), приводящие к возникновению явления электрического взрыва (ЭВ) металлических жил (оболочек) указанных проводов и кабелей и соответственно к выходу их из строя [1, 2]. Заметим, что явление ЭВ токонесущих частей может наблюдаться и в области промышленной электроэнергетики, когда не обоснованно используемые в силовых электросетях провода и кабели не рассчитаны на протекание через них больших токов короткого замыкания (КЗ), достигающих при длительностях их протекания до (60-100) мс амплитудных значений до (10-100) кА [3]. Одной из особенностей электроустановок ВСИТ, в отличие от электроустановок промышленной электроэнергетики, является то, что по токонесущим частям их электрических цепей могут протекать импульсные токи различных АВП, относящихся к нано-,

микро- и миллисекундному временным диапазонам. При этом амплитудные значения I_{mp} таких импульсных токов могут достигать значений, обычно изменяющихся в диапазоне (0,1-1000) кА [1, 2]. В [4] автором был приведен обобщенный электротехнический подход, позволяющий по условию термической стойкости кабельно-проводниковой продукции (КПП) осуществлять приближенный расчетный выбор предельно допустимых поперечных сечений S_{CCI} неизолированных проводов, изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) с поливинилхлоридной (ПВХ), резиновой (Р) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией, токонесущие части которых испытывают в адиабатическом режиме прямое воздействие аксиального импульсного тока $i_p(t)$, АВП которого с амплитудами $0,1 \text{ кА} \leq I_{mp} \leq 1000 \text{ кА}$ могут изменяться в нано-, микро- и миллисекундном временных диапазонах. В этой связи вопросы определения численных значений критических поперечных сечений S_{CCI} электрических проводов и кабелей применительно к силовым цепям ВСИТ остаются актуальными в мире и подлежащими своему решению.

Целью статьи является выполнение расчетного и экспериментального определений критических поперечных сечений S_{CCI} и плотностей δ_{CCI} тока в проводах и кабелях цепей ВСИТ, характеризующихся

© М.И. Баранов

протеканием по токонесущим частям их КПП импульсных аксиальных токов $i_p(t)$ с различными АВП.

1. Постановка задачи. Рассмотрим широко используемые в силовых электрических цепях ВСИТ неизолированные медные и алюминиевые провода, а также изолированные провода и кабели с медными (алюминиевыми) внутренними жилами и наружными оболочками (обратными токопроводами) с удельной электропроводностью γ_{0i} их немагнитного материала, имеющие обычно ПВХ, Р и ПЭТ изоляцию [1-3]. Принимаем, что по круглым сплошным или расщепленным медным (алюминиевым) жилам (оболочкам) указанных проводов и кабелей электрических цепей ВСИТ в их продольном направлении протекают импульсные токи $i_p(t)$, АВП которых соответствуют нано-, микро- или миллисекундному временным диапазонам с амплитудами I_{mp} , изменяющимися в диапазоне от 100 А до 1000 кА. Полагаем, что рассматриваемые провода и кабели размещены в окружающей воздушной среде, температура которой соответствует комнатной и равной $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ [2]. Считаем, что предварительная токовая нагрузка токонесущих частей КПП силовых цепей ВСИТ отсутствует. Поэтому первоначальная температура θ_{Ci} (до воздействия импульсного тока $i_p(t)$ на КПП) материала жилы (оболочки) провода (кабеля) будет равна температуре θ_0 окружающего воздуха. Используем допущение о том, что импульсный аксиальный ток $i_p(t)$ практически равномерно распределен по поперечному сечению S_{Ci} жилы и оболочки (экрана) провода (кабеля). При этом помним, что глубина проникновения $\Delta_i \approx [6t_m / (\pi\mu_0\gamma_{0i})]^{1/2}$ в квазистационарном режиме, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [2], импульса азимутального магнитного поля со временем t_m , соответствующим его амплитуде, например, для аperiodического микросекундного импульса тока искусственной молнии временной формы $\tau_f/\tau_p = 10$ мкс/350 мкс ($t_m \approx 1,6\tau_f \approx 16$ мкс) [5], где τ_f , τ_p – соответственно длительность фронта и длительность импульса тока на уровне его полуспада, в исследуемые ферромагнитные материалы жилы (оболочки) провода (кабеля) составляет для меди примерно 0,65 мм, а для алюминия – 0,82 мм [4]. Указанные численные значения Δ_i зачастую оказываются соизмеримыми с реальными радиусами жил и толщинами оболочек рассматриваемых проводов (кабелей), в которых может наблюдаться явление ЭВ токонесущих частей КПП. Для миллисекундных аксиальных импульсов тока $i_p(t)$ принятое допущение о равномерном характере его радиального распределения в исследуемых жилах (оболочках) проводов и кабелей становится еще более правомерным. Так, например, для аperiodического миллисекундного импульса длительной С-компоненты тока искусственной молнии временной формы $\tau_f/\tau_p = 7$ мс/160 мс ($t_m \approx 11$ мс) рассматриваемая глубина проникновения Δ_i для меди равна примерно 17 мм, а для алюминия – 22 мм. Используем условие адиабатического характера протекающих при временах действия импульсного тока $i_p(t)$ не более 1000 мс в материалах жил (оболочек) исследуемой КПП электротермических процессов, при котором влиянием теплоотдачи с поверхностей их токонесущих частей, имеющих текущую температуру $\theta_{Ci} \geq \theta_0$, и теплопроводности слоев их электропроводя-

щих материалов жилы (оболочки) и изоляции на джоулев нагрев токонесущих частей КПП пренебрегаем.

Требуется расчетным путем в приближенном виде определить критические сечения S_{CCi} токонесущих частей для неизолированных медных (алюминиевых) проводов, а также для изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, используемых в цепях ВСИТ и испытывающих прямое воздействие аксиального импульсного тока $i_p(t)$ различных амплитуд I_{mp} , изменяющегося в нано-, микро- и миллисекундном временных диапазонах. Кроме того, необходимо экспериментальным путем проверить на действующих электроустановках ВСИТ работоспособность полученных соотношений для приближенного расчета критических сечений S_{CCi} проводов (кабелей) и критических плотностей δ_{CCi} импульсного тока $i_p(t)$ в них.

2. Электротехнический подход к расчетному выбору критических сечений S_{CCi} и плотностей δ_{CCi} тока в электрических проводах и кабелях цепей ВСИТ. Для критических поперечных сечений S_{CCi} токопроводящих жил (оболочек) рассматриваемых не- и изолированных с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией электрических проводов и кабелей в цепях ВСИТ с импульсным аксиальным током $i_p(t)$ произвольных АВП из уравнения их теплового баланса в адиабатическом режиме джоулевого нагрева токонесущих частей КПП следует следующее расчетное соотношение [1]:

$$S_{CCi} = (J_{CiA})^{1/2} / D_{Cik}, \quad (1)$$

где $J_{CiA} = \int_0^{\tau_p} i_p^2(t) dt$ – интеграл действия импульсного

тока $i_p(t)$ с длительностью его протекания τ_p в КПП и заданными АВП, $\text{A}^2\cdot\text{c}$; $D_{Cik} = (J_{Cik})^{1/2}$, $\text{A}\cdot\text{c}^{1/2}/\text{M}^2$; J_{Cik} – критическое значение интеграла тока для материала токонесущих жил (оболочек) исследуемых электрических проводов и кабелей цепей ВСИТ, $\text{A}^2\cdot\text{c}/\text{M}^4$.

В табл. 1 при $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ приведены известные численные значения для таких основных характеристик медных и алюминиевых жил (оболочек) исследуемых проводов (кабелей) силовых цепей ВСИТ как γ_{0i} и J_{Cik} .

Таблица 1
Теплофизические характеристики материала рассматриваемых жил (оболочек) электрических проводов и кабелей силовых цепей ВСИТ до воздействия на них импульсного аксиального тока $i_p(t)$ (при $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$) [2]

Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Численное значение характеристики	
	$\gamma_{0i}, 10^7 (\text{OM}\cdot\text{M})^{-1}$	$J_{Cik}, 10^{17} \text{A}^2\cdot\text{c}\cdot\text{M}^{-4}$
Медь	5,81	1,95
Алюминий	3,61	1,09

Что касается расчетного определения в (1) интеграла действия J_{CiA} импульсного аксиального тока $i_p(t)$ с произвольными АВП, то для случая его изменения во времени t по аperiodическому закону вида [1]

$$i_p(t) = k_{p1} I_{mp} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (2)$$

где $\alpha_1 \approx 0,76/\tau_p$, $\alpha_2 \approx 2,37/\tau_f$ – соответственно коэффициенты формы аperiodического импульса тока с заданными АВП, протекающего в электрической цепи ВСИТ; $k_{p1} = [(\alpha_1/\alpha_2)^m - (\alpha_1/\alpha_2)^n]^{-1}$ – нормирующий

коэффициент; $m=\alpha_1/(\alpha_2-\alpha_1)$; $n=\alpha_2/(\alpha_2-\alpha_1)$, расчетное выражение для интеграла действия J_{CIA} протекающего в силовой цепи ВСИТ импульса тока $i_p(t)$ принимает следующий приближенный аналитический вид [4, 6]:

$$J_{CIA} \approx k_{p1} I_{mp}^2 \left[0,658\tau_p - 0,633\tau_f \right]. \quad (3)$$

В случае изменения во времени t воздействующего на материалы провода (кабеля) ВСИТ импульса тока $i_p(t)$ по закону затухающей синусоиды вида [1]

$$i_p(t) = k_{p2} I_{mp1} \exp(-\delta t) \sin(\omega t), \quad (4)$$

где $\delta=\Delta_p/T_p$ – коэффициент затухания тока; $\omega=2\pi/T_p$ – круговая частота колебаний тока; T_p – период колебаний тока; $\Delta_p=\ln(I_{mp1}/I_{mp3})$ – логарифмический декремент колебаний импульсного тока с первой I_{mp1} и третьей I_{mp3} амплитудами в цепи ВСИТ; $k_{p2}=[\exp(-\Delta_p/2\pi \arccos \Delta_p/2\pi) \sin(\arccos \Delta_p/2\pi)]^{-1}$ – нормирующий коэффициент для затухающего синусоидального тока, то приближенное расчетное выражение для интеграла действия J_{CIA} протекающего в силовой цепи ВСИТ импульсного аксиального тока $i_p(t)$ принимает следующий упрощенный аналитический вид [4]:

$$J_{CIA} \approx k_{p2}^2 I_{mp1}^2 [T_p (4\Delta_p)^{-1} - \Delta_p T_p (4\Delta_p^2 + 16\pi^2)^{-1}]. \quad (5)$$

Зная из нормативных документов или экспериментальных данных численные значения величин I_{mp} , τ_f , τ_p , Δ_p , T_p , с учетом оценки значений нормирующих коэффициентов k_{p1} и k_{p2} по (2)-(4) для указанных двух временных форм изменения импульсного тока $i_p(t)$ могут быть в приближенном виде (с погрешностью не более 10 %) рассчитаны критические поперечные сечения S_{CCI} токопроводящих жил (оболочек) проводов и кабелей, применяемых в электрических силовых цепях ВСИТ. Найдя численные значения сечений S_{CCI} , с учетом принятых допущений могут быть в первом приближении из соотношения вида $\delta_{CCI} \approx I_{mp1}/S_{CCI}$ определены и критические амплитуды плотностей δ_{CCI} импульсного тока $i_p(t)$ той или иной временной формы в электрических проводах и кабелях цепей ВСИТ.

3. Расчетный выбор критических сечений S_{CCI} и плотностей δ_{CCI} тока в электрических проводах (кабелях) для наносекундных импульсов тока в цепях ВСИТ. Остановимся на случае, когда по медным (алюминиевым) жилам (оболочкам) КПП протекает аperiodический импульс тока временной формы $\tau_f/\tau_p=5$ нс/200 нс, использовавшийся в свое время при имитации электромагнитного импульса (ЭМИ) высотного ядерного взрыва и испытаниях различных объектов военного и гражданского назначения на стойкость к поражающему действию указанного ЭМИ [4, 7, 8]. Из (2) находим, что для данного расчетного случая коэффициенты формы α_1 и α_2 используемого импульса тока $i_p(t)$ принимают следующие численные значения: $\alpha_1 \approx 3,8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$; $\alpha_2 \approx 4,7 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. При этом нормирующий коэффициент k_{p1} оказывается примерно равным $k_{p1} \approx 1,049$. В табл. 2 с учетом (3) для конкретного набора значений токовой амплитуды I_{mp} представлены численные значения интеграла действия J_{CIA} применительно к протекающему по токонесущим медным и алюминиевым частям исследуемых проводов и кабелей аperiodическому наносекундному импульсу тока временной формы $\tau_f/\tau_p=5$ нс/200 нс [4, 9].

Зная численные значения интеграла действия тока J_{CIA} (см. табл. 2) и интеграла тока J_{Cik} (см. табл. 1), по (1) сравнительно легко могут быть определены

критические сечения S_{CCI} рассматриваемых электрических проводов (кабелей). В табл. 3 приведены рассчитанные по (1) численные значения критических сечений S_{CCI} для неизолированных проводов с медными (алюминиевыми) жилами и изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, испытывающих действие аperiodического наносекундного импульса тока временной формы $\tau_f/\tau_p=5$ нс/200 нс.

Таблица 2

Численные значения интеграла действия J_{CIA} для наносекундного аperiodического импульса тока временной формы 5 нс/200 нс, протекающего в токонесущих частях рассматриваемой КПП [4]

Значение амплитуды $I_{mp}=I_{mp1}$ импульса тока временной формы 5 нс/200 нс, кА	Значение интеграла действия J_{CIA} импульса тока 5 нс/200 нс, $\text{А}^2 \cdot \text{с}$
1	0,141
10	14,13
30	$1,27 \cdot 10^2$
50	$3,53 \cdot 10^2$
70	$6,92 \cdot 10^2$
100	$1,41 \cdot 10^3$
200	$5,65 \cdot 10^3$
500	$3,53 \cdot 10^4$
1000	$1,41 \cdot 10^5$

Таблица 3

Численные значения критических сечений S_{CCI} для проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в силовых цепях ВСИТ с наносекундным импульсом тока вида 5 нс/200 нс, амплитуда которого изменяется в диапазоне от 10 кА до 500 кА

Вид изоляции в проводе (кабеле) силовой цепи ВСИТ	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значение сечения S_{CCI} , мм^2			
		Амплитуда I_{mp} импульса тока 5 нс/200 нс, кА			
		10	50	100	500
Без изоляции, ПВХ, Р и ПЭТ изоляция	Медь	0,008	0,042	0,085	0,425
	Алюминий	0,011	0,057	0,114	0,569

Из данных табл. 3 вытекает, что оценочные критические амплитуды плотностей $\delta_{CCI} \approx I_{mp}/S_{CCI}$ наносекундного импульса тока временной формы 5 нс/200 нс как для неизолированных проводов, так и проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией составляют соответственно примерно 1176 кА/мм² и 878 кА/мм².

4. Расчетный выбор критических сечений S_{CCI} и плотностей δ_{CCI} тока в электрических проводах (кабелях) для микросекундных импульсов тока в цепях ВСИТ. На рис. 1 приведена типичная осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии, формируемой в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора тока молнии (ГТМ) для испытаний объектов авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость по требованиям нормативных документов США [10, 11]. Видно, что эта компонента импульсов тока $i_p(t)$ имитируемой в лабораторных условиях молнии во времени t изменяется по закону затухающей синусоиды. Осуществив выбор критических сечений S_{CCI} и плотностей δ_{CCI} тока в токонесущих жилах (оболочках) проводов и кабелей для разрядной цепи ГТМ применительно к приведенному на рис. 1 импульсу тока $i_p(t)$ молнии.

Из опытных данных, представленных на рис. 1, получаем, что для используемого в приближенных расчетах критических сечений S_{CCI} большого экспоненциально затухающего синусоидального импульсного тока декремент его колебаний оказывается равным $\Delta_p = \ln(I_{mp1}/I_{mp3}) = 2,505$. Из (4) для этого вида импульса тока находим, что коэффициент $k_{p2} = 1,731$. Ниже в табл. 4 приведены рассчитанные по (5) численные значения интеграла действия J_{CIA} для микросекундного импульса тока, изменяющегося во времени t по закону затухающей синусоиды вида (4) [12].

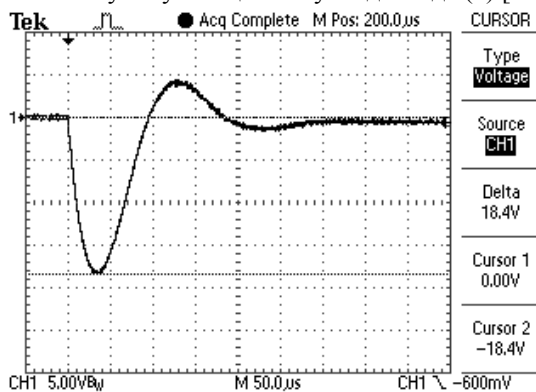


Рис. 1. Типичная осциллограмма микросекундной импульсной A-компоненты тока искусственной молнии, протекающей в разрядной цепи высоковольтного ГТМ ($I_{mp1} \approx 207$ кА; $I_{mp3} \approx 16,9$ кА; $T_p \approx 185$ мкс; масштаб по вертикали – 56,3 кА/деление; масштаб по горизонтали – 50 мкс/деление) [12]

Воспользовавшись (1) и сведенными в табл. 4 результатами расчетного определения интеграла действия J_{CIA} импульсного тока $i_p(t)$ вида (4), находим критические сечения S_{CCI} для исследуемых проводов (кабелей) в силовых цепях ВСИТ, в которых протекает микросекундный импульс тока вида (4) с АВП, соответствующими опытным данным, характерным для рис. 1. В табл. 5 представлены результаты такого расчетного определения критических сечений S_{CCI} для рассматриваемых проводов и кабелей, широко применяемых в разрядных силовых цепях ВСИТ [1, 2, 12].

Таблица 4
Значения интеграла действия J_{CIA} для импульса тока $i_p(t)$, изменяющегося в микросекундном временном диапазоне по закону затухающей синусоиды вида (4)

Значение первой амплитуды I_{mp1} затухающего синусоидального импульса тока, кА	Значение интеграла действия J_{CIA} импульса тока вида (4), $A^2 \cdot c$
10	$4,77 \cdot 10^3$
30	$4,29 \cdot 10^4$
50	$1,19 \cdot 10^5$
70	$2,34 \cdot 10^5$
100	$4,77 \cdot 10^5$
207	$2,05 \cdot 10^6$
300	$4,29 \cdot 10^6$
500	$11,92 \cdot 10^6$
700	$23,4 \cdot 10^6$
1000	$47,7 \cdot 10^6$

Из приведенных в табл. 5 расчетных данных следует, что оценочные критические амплитуды плотностей $\delta_{CCI} \approx I_{mp1}/S_{CCI}$ микросекундного импульса тока $i_p(t)$ с АВП, соответствующими опытным данным рис. 1, как для неизолированных проводов, так и проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (обо-

лочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией численно составляют соответственно около 64 кА/мм² и 48 кА/мм².

Таблица 5
Численные значения критических сечений S_{CCI} для проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в цепях ВСИТ с микросекундным импульсом тока вида (4), первая амплитуда I_{mp1} которого изменяется в диапазоне от 30 кА до 207 кА

Вид изоляции в проводе (кабеле) силовой цепи ВСИТ	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значение сечения S_{CCI} , мм ²			
		Первая амплитуда I_{mp1} импульса тока вида (4), кА			
		30	50	100	207
Без изоляции, ПВХ, Р и ПЭТ изоляция	Медь	0,469	0,781	1,564	3,243
	Алюминий	0,627	1,045	2,092	4,337

5. Расчетный выбор критических сечений S_{CCI} и плотностей δ_{CCI} тока в электрических проводах (кабелях) для миллисекундных импульсов тока в цепях ВСИТ. На рис. 2 показана типичная осциллограмма длительной C-компоненты тока искусственной молнии, генерируемой в лабораторных условиях согласно требований [10] в разрядной цепи ГТМ для целей экспериментального определения молнистойности объектов аэрокосмической техники в условиях прямого удара в них линейной молнии. Из данных рис. 2 видно, что апериодический импульс тока $i_p(t)$ искусственной молнии отрицательной полярности этой компоненты полного тока грозового разряда изменяется в миллисекундном временном диапазоне. Его амплитуда I_{mp} при $t_m \approx 11$ мс составляет примерно 835 А. При этом длительность фронта испытательного импульса тока составляет около $\tau_f \approx 7$ мс, а его длительность на уровне $0,5I_{mp} - \tau_p \approx 160$ мс. Кроме того, из данных рис. 2 следует, что полная длительность протекания используемой компоненты импульса тока $i_p(t)$ искусственной молнии в разрядной цепи высоковольтного ГТМ достигает значения около 1000 мс. На основании предлагаемого электротехнического подхода выполним выбор критических сечений S_{CCI} проводов (кабелей) для разрядной цепи ГТМ, участвующей в формировании указанного импульса тока $i_p(t)$.

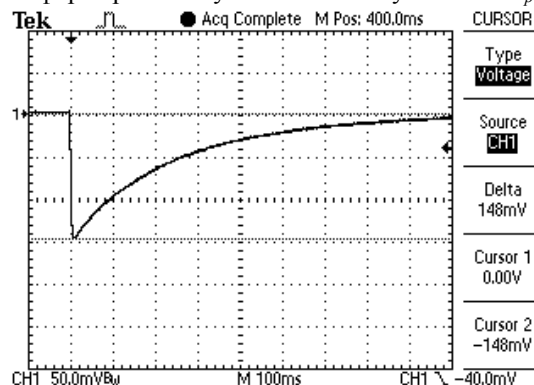


Рис. 2. Типичная осциллограмма миллисекундной длительной C-компоненты тока искусственной молнии, протекающей в разрядной цепи мощного высоковольтного ГТМ ($I_{mp} \approx 835$ А; $\tau_f \approx 7$ мс; $\tau_p \approx 160$ мс; масштаб по вертикали – 282 А/деление; масштаб по горизонтали – 100 мс/деление) [12]

Из (2) при $\tau_f \approx 7$ мс и $\tau_p \approx 160$ мс находим, что $\alpha_1 \approx 4,75$ с⁻¹, а $\alpha_2 \approx 3,38 \cdot 10^2$ с⁻¹. Тогда нормирующий коэффициент

ент k_{p1} принимает численное значение, равное около $k_{p1} \approx 1,077$. Используя (3) и варьируя значением амплитуды I_{mp} , можно рассчитать численные показатели интеграла действия $J_{C_{iA}}$ для используемого миллисекундного импульса тока $i_p(t)$. В табл. 6 приведены численные значения величины $J_{C_{iA}}$ для ряда амплитуд I_{mp} импульса тока $i_p(t)$ временной формы 7 мс/160 мс.

Таблица 6

Численные значения интеграла действия $J_{C_{iA}}$ для импульса тока $i_p(t)$, изменяющегося в цепи ВСИТ в миллисекундном временном диапазоне по закону вида (2)

Значение амплитуды $I_{mp}=I_{mp1}$ униполярного миллисекундного аperiodического импульса тока 7 мс/160 мс, А	Значение интеграла действия $J_{C_{iA}}$ миллисекундного импульса тока 7 мс/160 мс, $A^2 \cdot c$
100	$1,17 \cdot 10^3$
200	$4,68 \cdot 10^3$
300	$1,05 \cdot 10^4$
400	$1,87 \cdot 10^4$
500	$2,92 \cdot 10^4$
700	$5,73 \cdot 10^4$
835	$8,15 \cdot 10^4$
900	$0,95 \cdot 10^5$
1000	$1,17 \cdot 10^5$

Тогда с учетом данных табл. 6 по (1) в принятом приближении можно найти критические сечения S_{CCi} для неизолированных и изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, испытывающих воздействие аксиального миллисекундного аperiodического импульса тока $i_p(t)$, АВП которого соответствуют данным рис. 2. В табл. 7 приведены расчетные численные значения критических сечений S_{CCi} для указанных проводов (кабелей) с миллисекундным аperiodическим импульсом тока $i_p(t)$ временной формы 7 мс/160 мс, найденных описанным выше путем. Исходя из соотношения вида $\delta_{CCi} \approx I_{mp}/S_{CCi}$, данные табл. 7 позволяют оценить численные значения критических плотностей δ_{CCi} в проводах (кабелях), по которым в продольном направлении протекает миллисекундный аperiodический импульс тока $i_p(t)$ временной формы 7 мс/160 мс с амплитудой I_{mp} , изменяющейся в широком диапазоне от 100 А до 1000 А.

Таблица 7

Численные значения критических сечений S_{CCi} для неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией в цепях ВСИТ, испытывающих воздействие миллисекундного импульса тока временной формы 7 мс/160 мс, амплитуда I_{mp} которого изменяется от 100 А до 1000 А

Вид изоляции в проводе (кабеле) силовой цепи ВСИТ	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значение сечения S_{CCi} , mm^2			
		Амплитуда I_{mp} импульса тока 7 мс/160 мс, А			
		100	500	835	1000
Без изоляции, ПВХ, Р и ПЭТ изоляция	Медь	0,077	0,387	0,647	0,775
	Алюминий	0,103	0,518	0,865	1,036

Из приведенных в табл. 7 количественных данных следует, что оценочные критические амплитуды плотностей $\delta_{CCi} \approx I_{mp}/S_{CCi}$ миллисекундного аperiodического импульса тока $i_p(t)$ формы 7 мс/160 мс с АВП, соответствующими осциллограмме на рис. 2, для не-

изолированных проводов с медными и алюминиевыми жилами, а также проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (оболочками), имеющих ПВХ, Р и ПЭТ изоляцию, численно составляют примерно 1,29 кА/мм² и 0,97 кА/мм² соответственно.

6. Результаты экспериментальной проверки расчетных соотношений для выбора критических сечений S_{CCi} и плотностей δ_{CCi} тока в проводах (кабелях) цепей ВСИТ. Данную проверку работоспособности рекомендуемых для расчетного определения по соотношению (1) критических сечений S_{CCi} проводов (кабелей) и по соотношению $\delta_{CCi} \approx I_{mp}/S_{CCi}$ критических амплитуд плотностей импульсного тока $i_p(t)$ в их жилах (оболочках) осуществим на мощном высоковольтном ГТМ [13], моделирующем нормированные по [10] АВП импульсной А-компоненты тока искусственной молнии (см. рис. 1) и оснащенном поверенными государственной метрологической службой соответствующими средствами измерительной техники [15]. Для этого вначале осуществим на указанном генераторе воздействие этой компоненты тока молнии с нормированными по требованиям [10] АВП ($I_{mp1} \approx 205$ кА; $I_{mp3} \approx 16,9$ кА; $T_p \approx 200$ мкс; $\Delta_p \approx \ln(I_{mp1}/I_{mp3}) \approx 2,495$; $t_m \approx 38$ мкс; $J_{C_{iA}} \approx 2,17 \cdot 10^6$ А²·с), предварительно получаемой на эквиваленте нагрузки (кабеле марки РК 75-17-31 с медной жилой сечением 10,2 мм²), на опытный образец (ОО) длиной 0,55 м провода марки ПВ-2,5 с ПВХ изоляцией и сечением расщепленной медной жилы, равным $S_{C1} \approx 2,5$ мм². Согласно указанным выше исходным данным для АВП используемого затухающего синусоидального импульса тока микросекундного диапазона и (1) критическое сечение для испытываемого медного провода оказывается примерно равным $S_{CCi} \approx 3,34$ мм². Этому критическому сечению при $|I_{mp1}| \approx 205$ кА соответствует критическая амплитуда плотности данного импульса тока, численно равная $\delta_{CCi} \approx 61,4$ кА/мм². Видно, что $S_{C1} < S_{CCi}$. В этой связи можно было еще до проведения запланированного эксперимента заключить, что исследуемый провод при воздействии на его медную жилу сечением $S_{C1} \approx 2,5$ мм² импульсной А-компоненты тока молнии с нормированными АВП должен подвергнуться ЭВ и выйти из строя. Действительно, данное заключение подтвердил проведенный на указанном высоковольтном ГТМ в условиях высоковольтной лаборатории соответствующий электрофизический эксперимент, результаты которого применительно к характеру резкого изменения во времени t из-за ЭВ медной жилы сечением $S_{C1} \approx 2,5$ мм² испытываемого провода марки ПВ-2,5 с ПВХ изоляцией исходного импульса тока $i_p(t)$ представлены на рис. 3.

Из данных рис. 3 следует, что ЭВ в разрядной цепи указанного ГТМ медной жилы сечением $S_{C1} \approx 2,5$ мм² провода марки ПВ-2,5 с ПВХ изоляцией вызывает резкую деформацию протекающего по нему импульса тока $i_p(t)$ по сравнению с его исходной формой (см. рис. 1). Из осциллограммы на рис. 3 вытекает, что экспериментальное значение критической амплитуды плотности δ_{CCi} микросекундного импульса тока $i_p(t)$ в проведенном электрофизическом опыте составляет примерно $\delta_{CCi} \approx |I_{mp1}|/S_{C1} \approx 66,7$ кА/мм². По сравнению с расчетным значением критической амплитуды плотности δ_{CCi} используемого в эксперименте затухающего синусоидального импульса тока $i_p(t)$, составляющим $\delta_{CCi} \approx I_{mp}/S_{CCi} \approx 205$ кА/3,34 мм² $\approx 61,4$ кА/мм², по-

лученное опытное значение для критической плотности δ_{CC1} тока отличается от него примерно на 8 %.

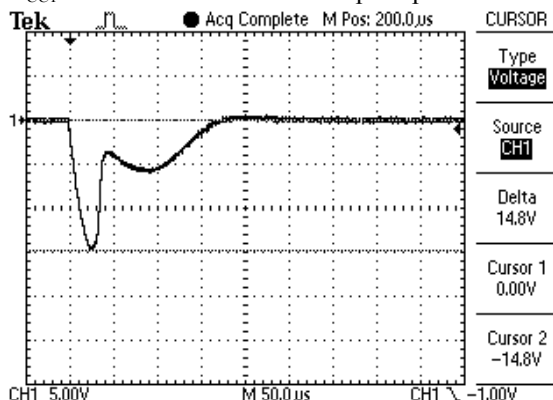


Рис. 3. Осциллограмма импульсной A - компоненты тока искусственной молнии, деформированной процессом ЭВ в разрядной цепи ГТМ расщепленной медной жилы сечением $S_{C1} \approx 2,5 \text{ мм}^2$ испытываемого ОО провода марки ПВ-2,5 длиной 0,55 м с ПВХ изоляцией ($I_{mp1} \approx 166,7 \text{ кА}$; $\delta_{CC1} \approx |I_{mp1}|/S_{C1} \approx 66,7 \text{ кА/мм}^2$; масштаб по вертикали – 56,3 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка) [1, 14]

На рис. 4 показан общий вид рабочего стола высоковольтного сильноточного ГТМ, на котором закреплен испытываемый на электротермическую стойкость к воздействию импульсной A - компоненты тока искусственной молнии с нормированными по [10, 11] АВП ($I_{mp1} \approx 205 \text{ кА}$; $I_{mp3} \approx 16,9 \text{ кА}$; $T_p \approx 200 \text{ мкс}$; $t_m \approx 38 \text{ мкс}$; $\Delta_p \approx \ln(I_{mp1}/I_{mp3}) \approx 2,495$; $J_{ClA} \approx 2,17 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$) ОО радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 длиной 0,55 м со сплошной медной жилой сечением $S_{C1} = 0,407 \text{ мм}^2$ и медной оплеткой сечением $S_{C2} = 2,44 \text{ мм}^2$ до воздействия на него указанного микросекундного импульсного тока $i_p(t)$. Внутренняя медная жила и наружная медная оболочка-оплетка на краях этого кабеля были соединены параллельно и вместе подключены к разрядной цепи сильноточного высоковольтного ГТМ [14].



Рис. 4. Общий вид рабочего стола ГТМ с жестко закрепленным на его массивных алюминиевых электродах испытываемого ОО радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 длиной 0,55 м со сплошной медной жилой сечением $S_{C1} = 0,407 \text{ мм}^2$ и медной оболочкой-оплеткой сечением $S_{C2} = 2,44 \text{ мм}^2$ до воздействия на него импульсной A - компоненты тока искусственной молнии с нормированными АВП (жила и оболочка-оплетка на концах этого кабеля были включены в сильноточную разрядную цепь ГТМ параллельно) [1, 14]

На рис. 5 приведена осциллограмма используемой в эксперименте импульсной A - компоненты тока искусственной молнии, деформированной ЭВ медных токонесущих частей испытываемого ОО радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 с суммарным поперечным сечением жилы и оплетки, равным $(S_{C1} + S_{C2}) \approx 2,85 \text{ мм}^2$.

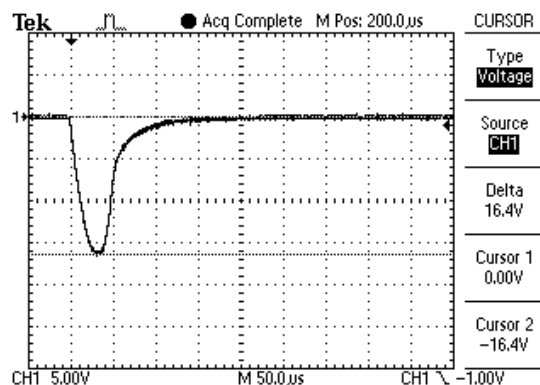


Рис. 5. Осциллограмма импульсной A - компоненты тока искусственной молнии, деформированной ЭВ в разрядной цепи ГТМ сплошной медной жилы сечением $S_{C1} \approx 0,407 \text{ мм}^2$ и медной оплетки сечением $S_{C2} = 2,44 \text{ мм}^2$ испытываемого ОО длиной 0,55 м радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 с ПЭТ изоляцией ($I_{mp1} \approx 184,7 \text{ кА}$; $\delta_{CC1} \approx |I_{mp1}|/(S_{C1} + S_{C2}) \approx 64,8 \text{ кА/мм}^2$; масштаб по вертикали – 56,3 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка) [1, 14]

На рис. 6 показан внешний вид рабочего стола ГТМ сразу после воздействия указанного импульса тока $i_p(t)$ на испытываемый в его сильноточной разрядной цепи ОО кабеля марки РК 75-4-11 с ПЭТ изоляцией и полным сечением его медных токонесущих частей $(S_{C1} + S_{C2}) \approx 2,85 \text{ мм}^2$. Из-за наступившего в ОО кабеля явления ЭВ его сплошной медной жилы и поллой медной оболочки-оплетки произошла сублимация его медных токонесущих частей с разрушением поясной и защитной ПЭТ изоляции испытываемого образца кабеля. Изоляционные и металлические элементы рабочего стола ГТМ подверглись активной металлизации парами меди буро-красного цвета (см. рис. 6). На данном столе в зоне ЭВ испытываемого ОО кабеля наблюдается присутствие мелких расплавленных и обугленных фрагментов его защитной ПЭТ изоляции.



Рис. 6. Внешний вид рабочего стола ГТМ после ЭВ токонесущих частей испытываемого в его сильноточной разрядной цепи ОО длиной 0,55 м радиочастотного кабеля марки РК 75-4-11 с ПЭТ изоляцией и включенным в разрыв разрядной цепи высоковольтного генератора суммарным сечением его медной жилы и медной оплетки, равным $(S_{C1} + S_{C2}) \approx 2,85 \text{ мм}^2$ ($I_{mp1} \approx 184,7 \text{ кА}$; $\delta_{CC1} \approx |I_{mp1}|/(S_{C1} + S_{C2}) \approx 64,8 \text{ кА/мм}^2$) [1, 14]

Из-за того, что для испытываемого кабеля марки РК 75-4-11 выполняется неравенство вида $(S_{C1} + S_{C2}) < S_{CC1}$ его токонесущие медные части вместе с ПВХ изоляцией были разрушены проявляющимся в проведенном опыте ЭВ сплошной круглой жилы и поллой оболочки-оплетки выбранного типоразмера КПП. При расчет-

ном значении по (1) критического сечения для этого типа кабеля, равно $S_{CCi} \approx 3,34 \text{ мм}^2$, расчетная критическая амплитуда плотности δ_{CCi} примененного в опыте микросекундного импульса тока $i_p(t)$ для него численно составляла $\delta_{CCi} \approx I_{mp}/S_{CCi} \approx 61,4 \text{ кА/мм}^2$. Из осциллограммы на рис. 5 вытекает, что экспериментальное значение критической амплитуды плотности δ_{CCi} указанного импульса тока $i_p(t)$ оказывается по модулю численно равным $\delta_{CCi} \approx I_{mp}/(S_{C1}+S_{C2}) \approx 64,8 \text{ кА/мм}^2$. Видно, что полученное опытное значение для величины критической амплитуды плотности δ_{CCi} импульса тока микросекундной длительности в исследуемом кабеле отличается от ее соответствующего расчетного значения не более чем на 6 %. Таким образом, выполненные на сильноточном высоковольтном ГТМ экспериментальные исследования применительно к микросекундному импульсу тока $i_p(t)$ подтвердили работоспособность предложенных расчетных соотношений по определению критических сечений S_{CCi} и критических амплитуд плотностей δ_{CCi} тока для указанного временного диапазона в токонесущих частях проводов и кабелей силовых цепей ВСИТ

Выводы. 1. Предложенный электротехнический подход позволяет по условию ЭВ в атмосферном воздухе токонесущих частей КПП осуществлять приближенный расчет критических поперечных сечений S_{CCi} и амплитуд плотностей δ_{CCi} тока для неизолированных проводов с медными (алюминиевыми) жилами, а также для изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, по которым протекает импульсный ток $i_p(t)$, АВП которого изменяются в нано-, микро- и миллисекундном временных диапазонах.

2. На основании полученных приближенных расчетных соотношений продемонстрированы конкретные возможности предложенного электротехнического подхода по выбору критических поперечных сечений S_{CCi} и амплитуд плотностей δ_{CCi} тока в указанных проводах и кабелях силовых цепей ВСИТ, по токонесущим частям которых протекают большие импульсные аксиальные токи $i_p(t)$, изменяющиеся во времени t по аperiодическому закону или закону затухающей синусоиды с первой токовой амплитудой I_{mp1} .

3. Расчетным путем установлено, что критические амплитуды плотностей $\delta_{CCi} \approx I_{mp1}/S_{CCi}$ импульсного тока $i_p(t)$ для его рассмотренных временных форм в медных (алюминиевых) жилах неизолированных проводов и изолированных проводах и кабелях с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией для наносекундного временного диапазона численно составляют соответственно примерно 1176 (878) кА/мм², для микросекундного временного диапазона – 64 (48) кА/мм² и для миллисекундного временного диапазона – 1,29 (0,97) кА/мм².

4. Выполненные с помощью сильноточного высоковольтного ГТМ эксперименты применительно к воздействию на медные токонесущие части провода марки ПВ-2,5 с ПВХ изоляцией и кабеля марки РК 75-4-11 с ПЭТ изоляцией микросекундного затухающего синусоидального импульса тока искусственной молнии с нормированными АВП согласно требований действующего в области молниезащиты объектов аэрокосмической техники документа США SAE ARP

5412: 2013 подтвердили работоспособность рекомендуемых расчетных соотношений для определения критических сечений S_{CCi} и амплитуд плотностей δ_{CCi} тока в указанных проводах и кабелях цепей ВСИТ.

5. Полученные результаты для критических сечений S_{CCi} и плотностей δ_{CCi} тока могут быть использованы также в практике осуществления в атмосферном воздухе с помощью электроустановок ВСИТ явления ЭВ неизолированных тонких металлических проводов (проволочек), применяемого в ряде современных прикладных электрофизических технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
3. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, Кн. 1 / Под общей ред. И.Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
4. Baranov M.I. A choice of sections of electric wires and cables in circuits of devices of high-voltage high-current impulse technique // Electrical engineering & electromechanics. – 2018. – no.6. – pp. 56-62. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.08.
5. Baranov M.I., Rudakov S.V. Electrothermal action of the pulse of the current of a short artificial-lightning stroke on test specimens of wires and cables of electric power objects // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. – vol.91. – no.2. – pp. 544-555. doi: 10.1007/s10891-018-1775-2.
6. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel // Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – no.1. – pp. 31-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.
7. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 3-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с.
8. Рикетс Л.У., Бриджес Дж.Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты / Пер. с англ. под ред. Н.А. Ухина. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
9. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
10. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
11. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
12. Баранов М.И., Кравченко В.И., Носенко М.А. Экспериментальные исследования электротермической стойкости металлических элементов летательного аппарата к прямому воздействию тока искусственной молнии. Часть 2: Стойкость медных проводов и кабелей // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – №2. – С. 46-55. doi: 10.20998/2074-272X.2011.2.11.
13. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects // Instruments and Experimental Technique. – 2008. – no.3. – pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
14. Баранов М.И., Кравченко В.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему воздействию импульсного тока молнии // Электричество. – 2013. – №10. – С. 7-15.
15. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage // Electrical engineering & electromechanics. – 2018. – no.5. – pp. 44-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.5.08.

REFERENCES

1. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Monografiya v 3 tomah. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Monograph in 3 vols. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
2. Knopfel' G. *Sverkhsil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
3. Orlov I.N. *Elektrotehnicheskij spravochnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoy energii. Tom 3, Kn. 1* [Electrical engineering handbook. Production and distribution of electric energy. Vol. 3, Book 1. Ed. I.N. Orlov]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 880 p. (Rus).
4. Baranov M.I. A choice of sections of electric wires and cables in circuits of devices of high-voltage high-current impulse technique. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.6, pp. 56-62. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.08.
5. Baranov M.I., Rudakov S.V. Electrothermal action of the pulse of the current of a short artificial-lightning stroke on test specimens of wires and cables of electric power objects. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol.91, no.2, pp. 544-555. doi: 10.1007/s10891-018-1775-2.
6. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. Calculation and experimental estimation of results of electro-thermal action of rationed by the international standard IEC 62305-1-2010 impulse current of short blow of artificial lightning on the thin-walled coverage from stainless steel. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.1, pp. 31-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.
7. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki: Monografiya v 3-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 3 vols. Vol. 2, book. 1: Theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2009. 384 p. (Rus).
8. Ricketts L.U., Bridges J.E., Mayletta J. *Elektromagnitnij impul's i metody zashchity* [Electromagnetic pulse and methods of protection]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 328 p. (Rus).
9. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. *Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizyruyushchim i elektromagnitnym izlucheniyam* [Ensuring stability of communications equipment to the ionizing and electromagnetic of radiations]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1988. 296 p. (Rus).
10. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.
11. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.
12. Baranov M.I., Kravchenko V.I., Nosenko M.A. Experimental research into electrothermal stability of aircraft metallic elements against direct action of artificial lightning current. Part 2: stability of copper wires and cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2011, no.2, pp. 46-55. doi: 10.20998/2074-272X.2011.2.11.
13. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
14. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Electrothermal resistance wire and cable to the aircraft to the striking action pulsed current lightning. *Electricity*, 2013, no.10, pp. 7-15. (Rus).
15. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.5, pp. 44-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.5.08.

Поступила (received) 12.11.2018

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., гл.н.с.,
НИПКИ «Молния»
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,

61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841,
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov
Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

Calculation and experimental determination of critical sections of electric wires and cables in the circuits of devices of high-voltage high-current pulse technique.

Purpose. Implementation of calculation and experimental determinations of critical sections and current densities in electric wires and cables of circuits of devices of high-voltage high-current impulse technique (HHIT), characterized flowing of pulse current $i_p(t)$ with different amplitude-temporal parameters (ATPs). **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high-voltage and large pulse currents, theoretical bases of electrical engineering, bases of electrical power energy, technique of high electric and magnetic fields, and also measuring technique. **Results.** The results of the developed electrical engineering approach are resulted in calculation choice on the condition of electric explosion (EE) in atmospheric air of current-carrying parts of cable-conductor products of critical sections of S_{CCi} of the uninsulated wires, and also the insulated wires and cables with polyvinyl chloride (PVC), rubber (R) and polyethylene (PET) insulation with copper (aluminum) cores (shells) on which in the circuits of HHIT the pulse axial-flow current $i_p(t)$ flows with arbitrary ATPs. On the basis of this approach the results of choice of critical sections S_{CCi} are shown for the indicated electric wires (cables) of power circuits of HHIT with pulse current, ATPs of which with amplitudes of $I_{mp}=(0.1-1000)$ kA change on a aperiodic law or law of attenuation of sine wave in nano-, micro- and millisecond temporal ranges. The results of calculation estimation of critical amplitudes of current densities δ_{CCi} of -pulses of current $i_p(t)$ of the examined temporal shapes are presented in the indicated electric wires and cables of circuits of HHIT. By a calculation way it is set that critical amplitudes of current densities δ_{CCi} of pulse current $i_p(t)$ for its indicated temporal shapes in the copper (aluminum) cores of the uninsulated wires and insulated wires and cables with copper (aluminum) cores (shells), PVC, R and PET insulation for nano-second range are numerically 1176 (878) kA/mm², for the microsecond range 64 (48) kA/mm² and for the millisecond range 1.29 (0.97) kA/mm². By the powerful high-voltage generator of current of artificial lightning experimental verification of applicability of the offered calculation relations is executed for the choice of critical sections S_{CCi} and amplitudes of current densities δ_{CCi} in wires (cables) at their EE. **Originality.** First by a calculation way for the specific temporal shapes of pulse currents $i_p(t)$ in the discharge circuits of HHIT, changing in nano-, micro- and millisecond temporal ranges with the wide change of the amplitudes I_{mp} on an aperiodic law or law of attenuation of sine wave, the numeral values of critical sections S_{CCi} and amplitudes of current densities δ_{CCi} are obtained for the uninsulated wires, insulated wires and cables with copper (aluminum) cores (shells), PVC, R and PET insulation. **Practical value.** Application of the obtained results is in practice of tests of objects of electrical power energy, aviation and space-rocket technique on resistibility to action of pulse currents $i_p(t)$ with different ATPs of natural (currents of the imitated lightning) and artificial (discharge currents of HHIT) origin will be instrumental in the increase of electro-thermal resistibility of the uninsulated wires, and also the insulated wires and cables with PVC, R and PET insulation of HHIT widely applied in power circuits. References 15, tables 7, figures 6.

Key words: high-voltage high-current pulse technique, electric wires and cables, calculation choice of critical sections of wires and cables in circuits of pulse technique, experiment.