

М.И. Баранов

ВЫБОР СЕЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ В ЦЕПЯХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИЛЬНОТОЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНИКИ

Надані результати розробленого узагальненого електротехнічного підходу до розрахункового вибору по умові термічної стійкості гранично допустимих перерізів $S_{\text{СИ}}$ електричних неізолюваних проводів, а також ізолюваних проводів і кабелів з полівінілхлоридною (ПВХ), гумовою (Г) і поліетиленовою (ПЕТ) ізоляцією з мідними (алюмінієвими) жилами (оболонками), по яким в колах високовольтної сильноточної імпульсної техніки (ВСИТ) протікає аксіальний імпульсний струм $i_p(t)$ з довільними амплітудно-часовими параметрами (АЧП). На підставі даного підходу продемонстровані результати конкретного вибору перерізів $S_{\text{СИ}}$ для вказаних електричних проводів (кабелів) силових кіл ВСИТ з імпульсним струмом, АЧП якого з амплітудами $I_{\text{мр}}=(0,1-1000)$ кА змінюються по аперіодичному закону або закону затухаючої синусоїди в нано-, мікро- і мілісекундному часових діапазонах. Представлені результати розрахункової оцінки гранично допустимої щільності $\delta_{\text{СИ}}$ імпульсного струму $i_p(t)$ часових форм, що розглядаються, у вказаних електричних проводах і кабелях силових кіл ВСИТ. Отримані результати сприятимуть підвищенню електротермічної стійкості електричних неізолюваних проводів, а також ізолюваних проводів і кабелів з ПВХ, Г і ПЕТ ізоляцією, які широко застосовуються в силових колах ВСИТ. Бібл. 13, табл. 11, рис. 2.

Ключові слова: високовольтна сильноточна імпульсна техніка, електричні дроти і кабелі, розрахунковий вибір гранично допустимих перерізів проводів і кабелів в колах імпульсної техніки.

Приведены результаты разработанного обобщенного электротехнического подхода к расчетному выбору по условию термической стойкости предельно допустимых сечений $S_{\text{СИ}}$ электрических 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 аксиальный импульсный ток $i_p(t)$ с произвольными амплитудно-временными параметрами (АВП). На основании данного подхода продемонстрированы результаты конкретного выбора сечений $S_{\text{СИ}}$ для указанных электрических проводов (кабелей) силовых цепей ВСИТ с импульсным током, АВП которого с амплитудами $I_{\text{мр}}=(0,1-1000)$ кА изменяются по аперіодическому закону или закону затухающей синусоиды в нано-, микро- и миллисекундному временных диапозонах. Представлены результаты расчетной оценки предельно допустимых плотностей $\delta_{\text{СИ}}$ импульсного тока $i_p(t)$ рассматриваемых временных форм в указанных электрических проводах и кабелях силовых цепей ВСИТ. Полученные результаты будут способствовать повышению электротермической стойкости электрических неизолированных проводов, а также изолированных проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, широко применяемых в силовых цепях ВСИТ. Библ. 13, табл. 11, рис. 2.

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

Введение. Одной из проблемных задач в области высоковольтной сильноточной импульсной техники (ВСИТ) является обоснованный выбор поперечных сечений S_C используемых в ней электрических проводов и кабелей. Известно, что по проводам и кабелям в области ВСИТ могут протекать в нормальных и аварийных режимах работы подобной техники импульсные токи $i_p(t)$ с различными амплитудно-временными параметрами (АВП). При этом амплитуды $I_{\text{мр}}$ данных токов могут изменяться в диапазоне от сотен ампер до тысяч килоампер, а их длительности τ_p – от десятков наносекунд до сотен миллисекунд [1, 2]. Известный подход по выбору сечений S_C электрических проводов (кабелей) для кратковременных режимов их работы, используемый сейчас в традиционной промышленной электроэнергетике, базируется на термической стойкости кабельно-проводниковой продукции (КПП) в условиях действия на нее тока короткого замыкания (КЗ) с заданными АВП [3]. В этом случае термическая стойкость электрических проводов и кабелей лимитируется предельно допустимой кратковременной температурой θ_{IS} нагрева частей проводов (кабелей) при КЗ. В табл. 1, согласно результатов из [3], приведены численные значения температуры θ_{IS} нагрева для основных проводниковых и изоляционных материалов электрических проводов и кабелей при КЗ. Из данных

табл. 1 видно, что величина θ_{IS} не должна превышать для используемых в силовых электроэнергетических цепях с током промышленной частоты 50 Гц неизолированных медных и алюминиевых шин (проводов) в режиме КЗ наибольшего уровня в 250 °С и 200 °С, а для кабелей (изолированных проводов) с медными и алюминиевыми жилами и ПВХ (Р), ПЭТ изоляцией – соответственно уровня в 150 °С и 120 °С [3].

Таблица 1
Значения предельно допустимой кратковременной температуры θ_{IS} нагрева для основных проводниковых и изоляционных материалов проводов (кабелей) промышленных электроэнергетических цепей при действии тока КЗ [3]

№	Наименование части провода (кабеля)	θ_{IS} , °С
1	Шина (жила) медная неизолированная при тяжениях менее 20 Н/мм ²	250
2	Шина (жила) алюминиевая неизолированная при тяжениях менее 10 Н/мм ²	200
3	Кабель и изолированный провод с медными (алюминиевыми) жилами и поливинилхлоридной (ПВХ) или резиновой (Р) изоляцией	150
4	Кабель и изолированный провод с медными (алюминиевыми) жилами и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией	120
5	Алюминиевая часть сталеалюминиевых проводов линий электропередачи	200

© М.И. Баранов

Укажем, что в промышленной электроэнергетике длительно допустимая температура θ_{II} нагрева токопроводящих и изоляционных частей электрических проводов и кабелей лимитируется условиями надежной работы электрических контактов и контактных соединений или условиями работы их изоляции [3]. В табл. 2, согласно данным [3], приведены известные численные значения температуры θ_{II} нагрева для основных видов электрических проводов и кабелей, применяемых в области современной электроэнергетики.

Таблица 2
Значения длительно допустимой температуры θ_{II} для основных видов электрических проводов (кабелей) [3]

№	Наименование провода (кабеля) или шины	θ_{II} , °С
1	Провода (шины) неизолированные с любыми токонесущими жилами (частями)	70
2	Кабели (провода) с медными (алюминиевыми) жилами, ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией	65
3	Кабели с изоляцией из пропитанной кабельной бумаги на напряжение до 6 кВ	65
4	Кабели с изоляцией из пропитанной кабельной бумаги на напряжение до 35 кВ	50

Из данных табл. 2 следует, что максимальная длительно допустимая температура θ_{II} нагрева для неизолированных проводов и кабелей с ПВХ, ПЭТ и Р изоляцией, находящихся под токовой нагрузкой в промышленных электроэнергетических цепях, не должна превышать соответственно уровня в 70 °С и 65 °С. Учитывая данные табл. 1 и 2, а также то условие, что провод (кабель) до импульсного воздействия на него тока КЗ был полностью электрически загружен и имел температуру θ_{II} , а при КЗ он нагрелся до температуры θ_{IS} , в [3] для выбора минимально допустимого сечения S_{Imin} электрического провода (кабеля) рекомендуется следующее расчетное соотношение:

$$S_{Imin} = B_k^{1/2} / C_k, \quad (1)$$

где $B_k = \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt$ – интеграл Джоуля (действия) тока $i_k(t)$

КЗ с длительностью t_k (методика расчета B_k изложена в [3]), $A^2 \cdot c$; C_k – коэффициент ($A \cdot c^{1/2} / \text{мм}^2$), численные значения которого приведены ниже в табл. 3.

Таблица 3
Значения коэффициента C_k для основных видов электрических проводов и кабелей промышленных электроэнергетических цепей при действии тока КЗ [3]

№	Наименование провода (кабеля) и шины	C_k , $A \cdot c^{1/2} / \text{мм}^2$
1	Провода (шины) медные неизолированные	170
2	Провода (шины) алюминиевые неизолированные	90
3	Кабели (изолированные провода) с ПВХ и Р изоляцией и медными жилами	120
4	Кабели (изолированные провода) с ПВХ и Р изоляцией и алюминиевыми жилами	75
5	Кабели (изолированные провода) с ПЭТ изоляцией и медными жилами	103
6	Кабели (изолированные провода) с ПЭТ изоляцией и алюминиевыми жилами	65

Принимая во внимание то, что АВП импульсных токов $i_p(t)$, используемых в области ВСИТ, обычно не соответствуют АВП тока КЗ в промышленной элек-

трической сети, применение (1) и данных табл. 3 для расчетного определения сечений S_C электрических проводов (кабелей) в цепях ВСИТ является принципиально невозможным техническим путем. В этой связи приближенный расчет сечений S_C электрических проводов и кабелей ВСИТ для различных АВП протекающего по ним импульсного тока $i_p(t)$ является актуальной прикладной научно-технической задачей.

Целью статьи является выполнение расчетного выбора сечений S_C электрических проводов и кабелей в цепях устройств ВСИТ, характеризующихся протеканием импульсного тока $i_p(t)$ с различными АВП.

1. Постановка задачи. Рассмотрим широко используемые в электрических цепях ВСИТ неизолированные медные и алюминиевые провода, а также изолированные провода и кабели с медными (алюминиевыми) внутренними жилами и наружными оболочками, имеющие ПВХ, Р и ПЭТ изоляцию [1, 2]. Принимаем, что по круглым сплошным или расщепленным медным (алюминиевым) жилам и 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 широком диапазоне от 0,1 кА до 1 МА. Полагаем, что исследуемые провода и кабели размещены в окружающей воздушной среде, температура которой составляет $\theta_0 = 20$ °С. Используем допущение о том, что в первом приближении импульсный ток $i_p(t)$ практически равномерно распределен по поперечному сечению S_{Ci} жилы ($i=1$) и оболочки ($i=2$) провода (кабеля). Одним из обоснований такого допущения является то, что, например, для импульса тока короткого грозового разряда временной формы $\tau_f/\tau_p = 10$ мкс/350 мкс (τ_f, τ_p – соответственно длительность фронта на уровне $(0,1-0,9)I_{mp}$ и длительность импульса тока на уровне $0,5I_{mp}$) глубина проникновения Δ_i азимутального магнитного поля указанного тока искусственной молнии в исследуемые ферромагнитные материалы провода (кабеля) составляет для меди примерно 0,65 мм и для алюминия – 0,82 мм [4]. Эти численные значения величины Δ_i на практике могут быть соизмеримы с реальными радиусами жилы и толщинами стенки оболочки провода (кабеля). Для импульсов тока $i_p(t)$, относящихся к миллисекундному временному диапазону (как для токов КЗ в цепях энергообъектов), использование подобного допущения при расчетах сечений S_{Ci} проводов (кабелей) становится еще более правомерным. Воспользуемся условием 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 их электропроводящих материалов и изоляции на Джоулев нагрев токонесущих частей жил (оболочек) проводов (кабелей) пренебрегаем. Считаем, что термическая стойкость проводов (кабелей) электрических цепей ВСИТ при воздействии на них импульсного тока $i_p(t)$ лимитируется их предельно допустимой кратковременной

Основные теплофизические характеристики материала токонесущих жил (оболочек) электрических неизолированных проводов и изолированных проводов и кабелей силовых цепей ВСИТ при $\theta_0=20\text{ }^\circ\text{C}$ [2, 6]

Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значения γ_{0i} , $10^7 \cdot (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	Значения c_{0i} , $10^6 \cdot \text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	Значения β_{0i} , $10^{-9} \cdot \text{м}^3/\text{Дж}$
Медь	5,81	3,92	1,31
Алюминий	3,61	2,70	2,14

Что касается расчетного определения в (2) интеграла действия J_{Cil} импульсного тока $i_p(t)$ с произвольными АВП, то для случая его изменения во времени t по аperiodическому закону вида

$$i_p(t) = k_{p1} I_{mp} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)], \quad (5)$$

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; $k_{p1} = [(a_1/a_2)^m - (a_1/a_2)^n]^{-1}$ – нормирующий коэффициент; $m = a_1/(a_2 - a_1)$; $n = a_2/(a_2 - a_1)$; расчетное выражение для интеграла действия J_{Cil} протекающего в цепи ВСИТ импульса тока $i_p(t)$ принимает следующий удобный аналитический вид [7]:

$$J_{Cil} \approx k_{p1} I_{mp}^2 [0,658\tau_p - 0,633\tau_f], \quad (6)$$

где τ_f , τ_p – соответственно длительность фронта и длительность полуспада импульса тока $i_p(t)$.

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

$$i_p(t) = k_{p2} I_{mp1} \exp(-\delta t) \sin(\omega t), \quad (7)$$

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; $k_{p2} = [\exp(-\Delta_p/2\pi \cdot \text{arcctg} \Delta_p/2\pi) \cdot \sin(\text{arcctg} \Delta_p/2\pi)]^{-1}$ – нормирующий коэффициент для затухающего синусоидального тока; расчетное выражение для интеграла действия J_{Cil} протекающего в цепи ВСИТ импульса тока $i_p(t)$ принимает следующий простой аналитический вид [5]:

$$J_{Cil} \approx k_{p2}^2 I_{mp1}^2 [T_p (4\Delta_p)^{-1} - \Delta_p T_p (4\Delta_p^2 + 16\pi^2)^{-1}]. \quad (8)$$

Из (4) видно, что при $\theta_l = \theta_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (провода и кабели обесточены) значение интеграла тока $J_{Cil} = 0$, что будет приводить по (2) к уменьшению сечения S_{Cil} .

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)-(8) для указанных временных форм изменения импульсного тока $i_p(t)$ могут быть в приближенном виде (с погрешностью до 5 %) рассчитаны предельно допустимые сечения S_{Cil} токопроводящих жил (оболочек) проводов и кабелей, применяемых в электрических цепях ВСИТ. Найдя значения сечений S_{Cil} , с учетом принятых допущений могут быть в первом приближении из соотношения вида $\delta_{Cil} \approx I_{mp}/S_{Cil}$ определены и предельно допустимые плотности импульсного тока $i_p(t)$ той или иной формы в электрических проводах (кабелях) цепей ВСИТ.

температурой нагрева θ_{Cis} , зависящей от степени снижения механической прочности материала жилы (оболочки) и тепловых условий работы изоляции КПП в режиме ее кратковременного нагрева импульсом тока нано-, микро- или миллисекундной длительности, протекающим по их токонесущим частям. Как и в [4] принимаем, что значение температуры θ_{Cis} соответствует известной из [3] предельно допустимой кратковременной температуре θ_{IS} нагрева проводов и кабелей токами КЗ промышленной частоты (см. табл. 1). Тогда в соответствии с данными табл. 1 для неизолированных медных (алюминиевых) проводов цепей ВСИТ величина θ_{Cis} будет численно составлять примерно $250\text{ }^\circ\text{C}$ ($200\text{ }^\circ\text{C}$), для их изолированных проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (оболочками) и ПВХ (Р) изоляцией – $\theta_{Cis} \approx 150\text{ }^\circ\text{C}$, а для их КПП с указанными жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – $\theta_{Cis} \approx 120\text{ }^\circ\text{C}$. Требуется расчетным путем в приближенном виде определить предельно допустимые сечения S_{Cil} токонесущих частей для неизолированных медных (алюминиевых) проводов, а также для изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПВХ (Р), ПЭТ изоляцией, используемых в цепях ВСИТ и испытывающих прямое воздействие аксиального импульсного тока $i_p(t)$ различных амплитуд I_{mp} в нано-, микро- и миллисекундном временных диапазонах.

2. Обобщенный подход к выбору сечений S_{Cil} электрических проводов (кабелей) в области ВСИТ. Для предельно допустимых сечений S_{Cil} токонесущих жил (оболочек) рассматриваемых электрических проводов и кабелей с аксиальным импульсным током $i_p(t)$ произвольных АВП из уравнения их теплового баланса в адиабатическом режиме следует следующее приближенное расчетное соотношение [5]:

$$S_{Cil} = (J_{Cil})^{1/2} / C_l, \quad (2)$$

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

тока $i_p(t)$ с длительностью протекания τ_p и заданными АВП, $\text{А}^2 \cdot \text{с}$; $C_l = (J_{Cis} - J_{Cil})^{1/2}$, $\text{А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{м}^2$; J_{Cis} , J_{Cil} – соответственно интегралы тока для токонесущих жил (оболочек) исследуемых электрических проводов и кабелей силовых цепей ВСИТ, предельно допустимая кратковременная и длительно допустимая температуры нагрева материала которых соответствуют величинам θ_{IS} (см. табл. 1) и θ_{II} (см. табл. 2), $\text{А}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^4$.

Для нахождения численных значений входящих в (2) интегралов тока J_{Cis} и J_{Cil} могут быть использованы следующие аналитические выражения [2, 5]:

$$J_{Cis} = \gamma_{0i} \beta_{0i}^{-1} \ln [c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{IS} - \theta_0) + 1]; \quad (3)$$

$$J_{Cil} = \gamma_{0i} \beta_{0i}^{-1} \ln [c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{II} - \theta_0) + 1], \quad (4)$$

где γ_{0i} , c_{0i} , β_{0i} – соответственно удельная электропроводность, удельная объемная теплоемкость и тепловой коэффициент удельной электропроводности материала жилы (оболочки) провода (кабеля) исследуемой электрической цепи ВСИТ до воздействия на них импульсного тока $i_p(t)$ с произвольными АВП.

В табл. 4 приведены численные значения величин γ_{0i} , c_{0i} и β_{0i} при температуре, равной $\theta_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ [2, 6].

3. Выбор сечений S_{CII} электрических проводов (кабелей) для наносекундных импульсов тока в области ВСИТ. Вначале остановимся на выборе сечений S_{CII} рассматриваемых проводов (кабелей), по медным (алюминиевым) жилам (оболочкам) которых при условиях $J_{CII}=0$ или $J_{CII}\neq 0$ протекает аксиальный аperiодический импульс тока временной формы $\tau_f/\tau_p=5$ нс/200 нс [8]. Заметим, что в свое время данный наносекундный импульс тока $i_p(t)$ обеих полярностей применялся при имитации в разрядных цепях ВСИТ с необходимыми воздушными системами полеобразования и соответственно в их рабочих воздушных объемах с испытываемыми техническими объектами различных габаритных размеров мощного электромагнитного импульса (ЭМИ) высотного ядерного взрыва (ВЯВ) [9, 10]. Из (5) находим, что для данного расчетного случая коэффициенты формы α_1 и α_2 импульса тока $i_p(t)$ принимают следующие численные значения: $\alpha_1\approx 3,8\cdot 10^6$ с⁻¹; $\alpha_2\approx 4,7\cdot 10^8$ с⁻¹. При этом для этого импульса тока нормирующий коэффициент k_{p1} оказывается примерно равным $k_{p1}\approx 1,049$. В табл. 5 по (6) представлены численные значения интеграла действия J_{CIA} для ряда значений амплитуды I_{mp} рассматриваемого мощного наносекундного импульса тока временной формы 5 нс/200 нс, использовавшегося при испытаниях технических объектов военного и гражданского назначения на стойкость к ЭМИ ВЯВ [9, 10].

Таблица 5
Значения интеграла действия J_{CIA} для наносекундного аperiодического импульса тока формы 5 нс/200 нс

Значение амплитуды I_{mp} импульса тока временной формы 5 нс/200 нс, кА	Значение интеграла действия J_{CIA} импульса тока 5 нс/200 нс, А ² ·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	$1,41\cdot 10^5$

В табл. 6 приведены рассчитанные по (2) численные значения коэффициента C_I для неизолированных проводов с медными (алюминиевыми) жилами и изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией для случаев их предварительной токовой загрузки ($J_{CII}\neq 0$) или полного обесточивания ($J_{CII}=0$).

Сравнение данных табл. 3 и 6 указывает на то, что численные значения коэффициентов C_k и C_I для рассматриваемых проводов и кабелей в случае, когда $J_{CII}\neq 0$ и величина этого интеграла тока определяется из формулы (4), отличаются в пределах от 3 до 8 %. В случае, когда $J_{CII}=0$ (традиционный для ВСИТ случай), эти отличия возрастают и составляют от 9 до 26 %. В табл. 7 на основе (2) и расчетных данных табл. 5 и 6 при $J_{CII}=0$ (провода и кабели в силовой цепи ВСИТ находятся без предварительной токовой загрузки) приведены результаты выбора предельно допустимых сечений S_{CII} для исследуемых проводов (кабелей) в цепях ВСИТ, вдоль которых протекает мощный нано-

секундный импульс тока временной формы 5 нс/200 нс с амплитудой I_{mp} , равной 10, 50, 100 и 500 кА.

Таблица 6
Значения коэффициента C_I для неизолированных проводов, изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в цепях ВСИТ с нано-, микро- и миллисекундными импульсами тока

Вид изоляции в проводе (кабеле) силовой цепи ВСИТ	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значения C_I , 10^8 А·с ^{1/2} /м ²	
		$J_{CII}=0$	$J_{CII}\neq 0$
Без изоляции	Медь	1,860	1,563
	Алюминий	1,096	0,880
ПВХ, Р	Медь	1,506	1,160
	Алюминий	0,972	0,745
ПЭТ	Медь	1,355	0,957
	Алюминий	0,877	0,616

Таблица 7
Значения предельно допустимых сечений S_{CII} для проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в цепях ВСИТ с наносекундным импульсом тока формы 5 нс/200 нс, амплитуда которого изменяется в широком диапазоне от 10 кА до 500 кА

Вид изоляции в проводе (кабеле) силовой цепи ВСИТ	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значения сечения S_{CII} , мм ²			
		Амплитуда I_{mp} импульса тока 5 нс/200 нс, кА			
		10	50	100	500
Без изоляции	Медь	0,020	0,101	0,202	1,010
	Алюминий	0,034	0,171	0,342	1,714
ПВХ, Р	Медь	0,025	0,125	0,250	1,250
	Алюминий	0,039	0,193	0,386	1,933
ПЭТ	Медь	0,028	0,138	0,278	1,386
	Алюминий	0,043	0,214	0,428	2,142

Из данных табл. 7 вытекает, что оценочная предельно допустимая плотность $\delta_{CII}\approx I_{mp}/S_{CII}$ наносекундного импульса тока формы 5 нс/200 нс для неизолированных проводов с медными и алюминиевыми жилами составляет примерно 495 кА/мм² и 293 кА/мм², а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 361 (233) кА/мм².

4. Выбор сечений S_{CII} электрических проводов (кабелей) для микросекундных импульсов тока в области ВСИТ. На рис. 1 приведена типичная осциллограмма импульсной А-компоненты тока искусственной молнии, воспроизводимой в разрядной цепи мощного генератора тока молнии (ГТМ) для испытаний объектов авиационной и ракетно-космической техники на молниестойкость по требованиям нормативных документов США SAE ARP 5412: 2013 [11] и SAE ARP 5416: 2013 [12]. Видно, что указанная компонента импульсного тока $i_p(t)$ имитируемой в лабораторных условиях молнии во времени t изменяется по закону затухающей синусоиды. Осуществим выбор сечений S_{CII} проводов и кабелей для разрядной цепи ГТМ применительно к данному импульсу тока $i_p(t)$.

Из экспериментальных данных, представленных на рис. 1, находим, что для используемого в расчетах сечений S_{CII} биполярного колебательного импульса тока $\Delta_p=\ln(I_{mp1}/I_{mp3})=2,505$. Тогда по (7) для этого тока

коэффициент $k_{p2}=1,731$. В табл. 8 приведены рассчитанные по (8) численные значения интеграла действия J_{CIA} для данного микросекундного импульса тока [13], изменяющегося по закону затухающей синусоиды.

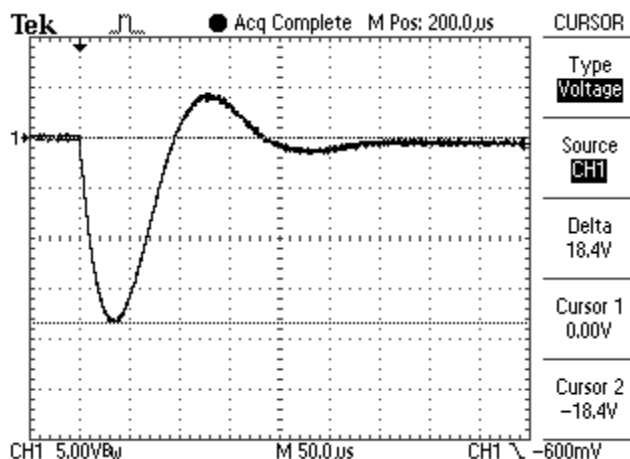


Рис. 1. Типичная осциллограмма микросекундной импульсной A-компоненты тока искусственной молнии, протекающей в разрядной цепи высоковольтного ГТМ ($I_{mp1} \approx 207$ кА; $I_{mp3} \approx 16,9$ кА; $T_p \approx 185$ мкс; масштаб по вертикали – 56,3 кА/деление; масштаб по горизонтали – 50 мкс/деление) [13]

Таблица 8

Значения интеграла действия J_{CIA} для импульса тока $i_p(t)$, изменяющегося в микросекундном временном диапазоне по закону затухающей синусоиды вида (7)

Значение первой амплитуды I_{mp1} затухающего синусоидального импульса тока, кА	Значение интеграла действия J_{CIA} импульса тока вида (7), А ² ·с
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	$47,7 \cdot 10^6$

Воспользовавшись расчетными данными для коэффициента C_b , приведенными в табл. 6, (2) и сведенными в табл. 8 результатами определения интеграла действия J_{CIA} , находим предельно допустимые сечения S_{Cil} для исследуемых проводов (кабелей) в цепях ВСИТ, в которых протекает микросекундный импульс тока вида (7) с АВП, соответствующими данным, характерным для рис. 1. В табл. 9 при $J_{Cil}=0$ представлены результаты такого определения предельно допустимых сечений S_{Cil} для рассматриваемых проводов и кабелей, применяемых в разрядных цепях ВСИТ.

Из приведенных в табл. 9 расчетных данных следует, что оценочная предельно допустимая плотность $\delta_{Cil} \approx I_{mp1}/S_{Cil}$ микросекундного импульсного тока $i_p(t)$ с АВП, соответствующими данным рис. 1, для неизолированных проводов с медными и алюминиевыми жилами составляет примерно 26 кА/мм² и 15 кА/мм², а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 19 (12) кА/мм².

Таблица 9

Значения предельно допустимых сечений S_{Cil} для проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в цепях ВСИТ с микросекундным импульсом тока вида (7), первая амплитуда I_{mp1} которого изменяется в широком диапазоне от 30 кА до 207 кА

Вид изоляции в проводе (кабеле) силовой цепи ВСИТ	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значения сечения S_{Cil} , мм ²			
		Первая амплитуда I_{mp1} импульса тока вида (7), кА			
		30	50	100	207
Без изоляции	Медь	1,113	1,854	3,713	7,698
	Алюминий	1,889	3,147	6,301	13,06
ПВХ, Р	Медь	1,375	2,290	4,586	9,507
	Алюминий	2,131	3,549	7,105	14,73
ПЭТ	Медь	1,528	2,546	5,097	10,57
	Алюминий	2,362	3,933	7,875	16,32

5. Выбор сечений S_{Cil} электрических проводов (кабелей) для миллисекундных импульсов тока в области ВСИТ. На рис. 2 показана типичная осциллограмма длительной C-компоненты тока искусственной молнии, генерируемой по требованиям [11, 12] в разрядной цепи ГТМ для целей опытного определения молниестойкости объектов аэрокосмической техники в условиях их полета в воздушной атмосфере. Видно, что аperiodический импульс тока $i_p(t)$ отрицательной полярности этой компоненты в составе полного тока искусственного грозового разряда изменяется в миллисекундном временном диапазоне. Его амплитуда I_{mp} , которой соответствует время $t_{mp} \approx 11$ мс, составляет около 835 А. При этом длительность фронта испытательного токового импульса составляет примерно $\tau \approx 7$ мс, а его длительность на уровне $0,5I_{mp} - \tau_p \approx 160$ мс. Полная длительность протекания указанной компоненты импульса тока искусственной молнии в токопроводах разрядной цепи мощного высоковольтного ГТМ по требованиям [11, 12] достигает около 1000 мс. На основании предлагаемого электротехнического подхода выполним выбор сечений S_{Cil} проводов (кабелей) для разрядной цепи ГТМ, участвующей в генерировании указанного импульса тока $i_p(t)$.

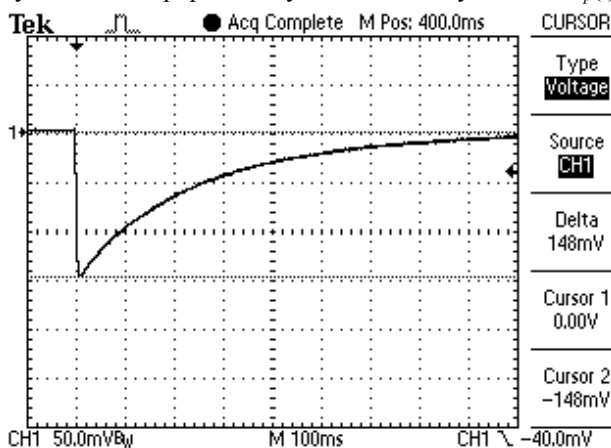


Рис. 2. Типичная осциллограмма миллисекундной длительной C-компоненты тока искусственной молнии, протекающей в разрядной цепи мощного высоковольтного ГТМ ($I_{mp} \approx 835$ А; $\tau \approx 7$ мс; $\tau_p \approx 160$ мс; масштаб по вертикали – 282 А/деление; масштаб по горизонтали – 100 мс/деление) [13]

Из (5) при $\tau \approx 7$ 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 k_{p1} принимает численное значение, равное примерно

$k_{p1} \approx 1,077$. Используя (5) и варьируя значением токовой амплитуды I_{mp} , можно рассчитать численные показатели интеграла действия J_{CIA} для рассматриваемого миллисекундного импульса тока $i_p(t)$. В табл. 10 приведены численные значения величины J_{CIA} для ряда амплитуд I_{mp} данного импульсного тока $i_p(t)$.

Таблица 10

Значения интеграла действия J_{CIA} для униполярного импульса тока $i_p(t)$, изменяющегося в миллисекундном временном диапазоне по аperiодическому закону

Значение амплитуды I_{mp} униполярного миллисекундного аperiодического импульса тока 7 мс/160 мс, А	Значение интеграла действия J_{CIA} миллисекундного импульса тока 7 мс/160 мс, А ² ·с
100	$1,17 \cdot 10^3$
200	$4,68 \cdot 10^3$
300	$1,05 \cdot 10^4$
500	$2,92 \cdot 10^4$
700	$5,73 \cdot 10^4$
835	$8,15 \cdot 10^4$
1000	$1,17 \cdot 10^5$

Далее, принимая, что $J_{CII}=0$ (провода и кабели в разрядной цепи ВСИТ предварительно обесточены), воспользуемся результатами приближенного расчета коэффициента C_b , сведенными в табл. 6. С учетом этих численных значений C_l и данных табл. 10 по (2) в принятом приближении можно найти предельно допустимые сечения S_{CII} для неизолированных и изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, испытывающих воздействие аксиального миллисекундного аperiодического импульса тока $i_p(t)$, АВП которого соответствуют данным рис. 2. В табл. 11 приведены численные значения предельно допустимых сечений S_{CII} для указанных проводов (кабелей) с миллисекундным аperiодическим импульсом тока $i_p(t)$, найденных описанным выше путем. Исходя из соотношения вида $\delta_{CII} \approx I_{mp}/S_{CII}$, данные табл. 11 позволяют оценить численные значения предельно допустимых плотностей δ_{CII} в проводах (кабелях), по которым в продольном направлении протекает миллисекундный аperiодический импульс тока $i_p(t)$ с амплитудой I_{mp} , изменяющейся в диапазоне (100-1000) А.

Таблица 11

Значения предельно допустимых сечений S_{CII} для неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в цепях ВСИТ с миллисекундным аperiодическим импульсом тока 7 мс/160 мс, амплитуда I_{mp} которого изменяется в диапазоне от 100 А до 1000 А

Вид изоляции в проводе (кабеле) силовой цепи ВСИТ	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значения сечения S_{CII} , мм ²			
		Амплитуда I_{mp} импульса тока 7 мс/160 мс, А			
		100	500	835	1000
Без изоляции	Медь	0,184	0,919	1,535	1,839
	Алюминий	0,312	1,559	2,605	3,121
ПВХ, Р	Медь	0,227	1,135	1,896	2,271
	Алюминий	0,352	1,758	2,937	3,519
ПЭТ	Медь	0,252	1,261	2,107	2,524
	Алюминий	0,390	1,948	3,255	3,900

Из приведенных в табл. 11 данных следует, что оценочная предельно допустимая плотность δ_{CII} мил-

лисекундного аperiодического импульса тока $i_p(t)$ с АВП, соответствующими данным рис. 2, для неизолированных проводов с медными и алюминиевыми жилами составляет примерно 543 А/мм² и 320 А/мм², а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 396 (256) А/мм².

Результаты экспериментальных исследований в разрядных цепях ВСИТ с импульсными токами $i_p(t)$ микро- и миллисекундной длительности электротермической стойкости опытных образцов неизолированных проводов, изолированных проводов и кабелей с медными жилами (оболочками) с ПВХ и ПЭТ изоляцией, представленные автором в [5, 13], подтверждают правомерность основных расчетных данных по выбору сечений S_{CII} , приведенных в табл. 9 и 11.

Выводы.

1. Представленный обобщенный электротехнический подход позволяет по условию термической стойкости КПП осуществлять приближенный расчетный выбор предельно допустимых поперечных сечений S_{CII} неизолированных проводов, изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, токонесящие части которых испытывают воздействие аксиального импульса тока $i_p(t)$, АВП которого с различными амплитудами I_{mp} могут изменяться в нано-, микро- и миллисекундном временных диапазонах.

2. На примерах изменения во времени t протекающего по указанным проводам (кабелях) импульсного тока $i_p(t)$ по аperiодическому закону или закону затухающей синусоиды продемонстрированы возможности предложенного электротехнического подхода по конкретному выбору предельно допустимых сечений S_{CII} для рассмотренных видов неизолированных проводов, изолированных проводов и кабелей, широко применяемых в разрядных цепях ВСИТ.

3. Показано, что в первом приближении предельно допустимые плотности $\delta_{CII} \approx I_{mp}/S_{CII}$ рассмотренных временных форм импульсного тока $i_p(t)$ в медных (алюминиевых) жилах неизолированных проводов для наносекундного диапазона численно составляют около 495 (293) кА/мм², для микросекундного диапазона – 26 (15) кА/мм² и для миллисекундного диапазона – 543 (320) А/мм². Для изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией численные значения предельно допустимых плотностей δ_{CII} рассмотренных импульсных токов $i_p(t)$ для наносекундного диапазона составляют около 361 (233) кА/мм², для микросекундного диапазона – 19 (12) кА/мм² и для миллисекундного диапазона – 396 (256) А/мм².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
2. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Харьков: Точка, 2014. – 400 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., 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.
5. Баранов М.И., Кравченко В.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к по-

ражающему действию импульсного тока молнии // Электротехника. – 2013. – №10. – С. 7-15.

6. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.

7. 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. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.

8. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с.

9. 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.

10. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.

11. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.

12. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.

13. 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.

REFERENCES

1. Mesiats G.A. *Impul'snaia energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. (Rus).

2. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).

3. Orlov I.N. *Elektrotehnicheskij spravocnik. 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., 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.

5. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Electrothermal resistance wire and cable to the aircraft to the striking action pulsed current lightning. *Elektrichestvo*, 2013, no.10, pp. 7-15. (Rus).

6. Knöpfel' G. *Sverksil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).

7. 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. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.06.

8. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 2 vols. Vol. 2, book. 1: Theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2009. 384 p. (Rus).

9. 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).

10. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. *Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ioniziruyushchim i elektromagnitnym izlucheniyam* [Ensuring stability of communications equipment to the ionizing and electromagnetic of radiations]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1988. 296 p. (Rus).

11. SAE ARP 5412: 2013. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-56.

12. SAE ARP 5416: 2013. Aircraft Lightning Test Methods. SAE Aerospace. USA, 2013. – pp. 1-145.

13. 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. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2011.2.11.

Поступила (received) 07.08.2018

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.

A choice of sections of electric wires and cables in circuits of devices of high-voltage high-current impulse technique.

Purpose. Implementation of calculation choice of sections of electric wires and cables in circuits of devices of high-voltage high-current impulse technique (HHIT), characterized flowing of pulsed current $i_p(t)$ with different amplitude-temporal parameters (ATP).

Methodology. Electrophysics bases of technique of high-voltage and high pulsed currents, theoretical bases of the electrical engineering, bases of electrical power engineering, technique of high electric and magnetic fields, and also measuring technique. **Results.**

The results of the developed generalized electrical engineering investigations are resulted in a calculation choice on the condition of thermal resistibility of cable products of boundary permissible sections S_{Cil} of the electric uninsulated wires, and also insulated wires and cables with copper (aluminum) cores (shells) with polyvinyl chloride (PVC), rubber (R) and polyethylene (PET) insulation, on which in the circuits of HHIT the axial-flow of pulsed current $i_p(t)$ flows with arbitrary ATP. On the basis of this approach the results of concrete choice of sections S_{Cil} are presented for the indicated electric wires (cables) of power circuits of HHIT with pulsed current, ATP of which with amplitudes of $I_{mp}=(0.1-1000)$ kA change on an aperiodic law or law of damped sinusoid in nano-, micro- and millisecond temporal ranges. The results of calculation estimation present maximum permissible approximations of δ_{Cil} of pulsed current $i_p(t)$ of the examined temporal shapes in the indicated electric wires and cables of power circuits of HHIT. It is shown that the values of current approximations of δ_{Cil} for the uninsulated copper (aluminum) wires in the nanosecond temporal range of ATP of pulsed currents $i_p(t)$ are about 495 (293) kA/mm², in the microsecond temporal range – 26 (15) kA/mm² and in a millisecond temporal range – 543 (320) A/mm². By a calculation it is set that for the insulated wires (cables) with copper (aluminum) cores (shells) and PET with insulation the indicated current approximation of δ_{Cil} is approximately: for the nanosecond range – 361 (233) kA/mm²; for the microsecond range – 19 (12) kA/mm²; for the millisecond range – 396 (256) A/mm². **Originality.** Firstly by a calculation for the concrete temporal shapes of pulses of current $i_p(t)$ in the discharge circuits of HHIT, changing in the wide range of the amplitudes I_{mp} on a aperiodic law or law of damped sinusoid, the numeral values of cross-sections S_{Cil} and current approximations of δ_{Cil} are obtained for the uninsulated wires, insulated wires and cables with copper (aluminum) cores (shells) with PVC, R and PET insulation. **Practical value.** Application in practice of model tests of objects of electrical power engineering, aviation and space-rocket technique on resistibility to direct action of pulsed currents $i_p(t)$ with different ATP of natural (currents of lightning) and artificial (discharge currents of HHIT) origin to increase electro-thermal resistibility of the electric uninsulated wires, and also the insulated wires and cables with PVC, R and PET insulation of HHIT widely applied in power circuits. References 13, tables 11, figures 2.

Key words: high-voltage high-current impulse technique, electric wires and cables, calculation choice of boundary permissible sections of wires and cables in the circuit of impulse technique.