

М.И. Баранов, С.Г. Буряковский, В.В. Князев

## Деструкция полимерной изоляции и пороговые амплитуды импульсов тока различной временной формы для электрических проводов и кабелей в слабо- и силовых цепях устройств импульсной энергетики, электротехники и электроники

Запропонована інженерна методика за розрахунковим визначенням порогових амплітуд  $I_{\text{мрк}}$  імпульсів струму  $i_p(t)$  різної часової форми для електричних проводів і кабелів з поліетиленовою, полівинилхлоридною і гумовою ізоляцією, широко вживаних в галузі імпульсної енергетики, високовольтної сильнотримої техніки, вимірювальної техніки і електроніки, а також в системах імпульсного електроживлення, контролю, управління роботою і діагностики стану функціонування електротехнічних пристроїв різного загальногромадянського і військового призначення. В якості вихідного критеріального положення при виборі порогових амплітуд  $I_{\text{мрк}}$  імпульсів струму  $i_p(t)$  довільних амплітудно-часових параметрів для вказаних проводів і кабелів була вибрана термічна стійкість їх поясної ізоляції, яка відповідає гранично допустимим короточасним температурам нагріву мідних (алюмінієвих) і ізоляційних частин досліджуваних кабелів (проводів) і що не допускає настання явища деструкції в ізоляції даної кабельно-провідникової продукції. Приведені приклади практичного використання запропонованої методики за розрахунковим визначенням порогових амплітуд  $I_{\text{мрк}}$  стандартних аперіодичних імпульсів струму  $i_p(t)$  часової форми 5 нс/200 нс, 10 мкс/350 мкс і 7 мс/160 мс для радіочастотного коаксіального середньогабаритного кабелю марки РК 50-4-11 зі суцільною поліетиленовою ізоляцією. Бібл. 20, табл. 2.

**Ключові слова:** електричні проводи і кабелі з полімерною ізоляцією, електротермічна стійкість кабельно-провідникової продукції, деструкція ізоляції, порогові амплітуди імпульсів струму для проводів і кабелів.

Предложена инженерная методика по расчетному определению пороговых амплитуд  $I_{\text{мрк}}$  импульсов тока  $i_p(t)$  различной временной формы для электрических проводов и кабелей с полиэтиленовой, поливинилхлоридной и резиновой изоляцией, широко применяемых в области импульсной энергетики, высоковольтной силовой техники, измерительной техники и электроники, а также в системах импульсного электропитания, контроля, управления работой и диагностики состояния функционирования электротехнических устройств различного общегражданского и военного назначения. В качестве исходного критеріального положения при выборе пороговых амплитуд  $I_{\text{мрк}}$  импульсов тока  $i_p(t)$  произвольных амплитудно-временных параметров для указанных проводов и кабелей была выбрана термическая стойкость их поясной изоляции, соответствующая предельно допустимым кратковременным температурам нагрева медных (алюминиевых) и изоляционных частей исследуемых кабелей (проводов) и не допускающая наступления явления деструкции в изоляции рассматриваемой кабельно-провідникової продукції. Приведены примеры практического использования предлагаемой методики по расчетному определению пороговых амплитуд  $I_{\text{мрк}}$  стандартных аперіодических импульсов тока  $i_p(t)$  временной формы 5 нс/200 нс, 10 мкс/350 мкс и 7 мс/160 мс для радиочастотного коаксіального среднегабаритного кабеля марки РК 50-4-11 со сплошной полиэтиленовой изоляцией. Библ. 20, табл. 2.

**Ключевые слова:** электрические провода и кабели с полимерной изоляцией, електротерміческая стійкість кабельно-провідникової продукції, деструкція ізоляції, порогові амплітуди імпульсів струму для проводів і кабелів.

**Состояние и актуальность задачи.** В области традиционной электроэнергетики известен электротехнический подход по инженерному выбору поперечных сечений  $S_C$  электрических проводов и кабелей с полимерной изоляцией, используемых как для длительных, так и кратковременных режимов их работы [1]. Данный подход базируется на термической стойкости подобной кабельно-провідникової продукції (КПП) в условиях прямого воздействия на нее тока короткого замыкания (КЗ) с заданными амплитудно-временными параметрами (АВП). В этом случае термическая стойкость электрических кабелей (проводов) любой конструкции лимитируется предельно допустимой кратковременной температурой  $\theta_{IS}$  нагрева их металлических и изоляционных частей при режиме одно-, двух и трехфазного КЗ в электрической сети [1]. Согласно электротехническим данным из [1] указанная температура  $\theta_{IS}$  не должна превышать для используемых в силовых электроэнергетических цепях с переменным током промышленной частоты 50 Гц неизолированных (оголенных) медных и алюминиевых шин (проводов) в режиме КЗ наибольшего уровня в 250 °С и 200 °С, а для кабелей (изолированных проводов) с медными (алюминиевыми) жилами,

поливинилхлоридной (ПВХ), резиновой (Р) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией – соответственно уровня температуры в 150 °С и 120 °С. Кроме того, известно и то, что в области промышленной электроэнергетики длительно допустимая температура  $\theta_{II}$  нагрева токопроводящих (изоляционных) частей различных электрических проводов и кабелей лимитируется условиями надежной работы электрических контактов и контактных соединений их цепей, а также условиями работы их изоляции [1]. При этом максимальная длительно допустимая температура  $\theta_{II}$  нагрева для основных видов оголенных проводов (шин) и кабелей (проводов) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, находящихся под токовой нагрузкой в промышленных электроэнергетических цепях, не должна численно превышать соответственно уровня в 70 °С и 65 °С [1]. С учетом изложенных выше электротехнических данных и выполнения тех исходных условий, что кабель (провод) до действия на него переменного тока КЗ был полностью электрически нагружен и имел температуру  $\theta_{II}$ , а при наступлении режима КЗ он нагрелся до температуры  $\theta_{IS}$ , в [1] для выбора минимально допустимого сечения

$S_{lmin}$  электрического провода (кабеля) рекомендуется следующее расчетное аналитическое соотношение:

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

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

$i_k(t)$  с его длительностью  $t_k$  протекания в КПП,  $A^2 \cdot c$ ;  $C_k$  – постоянный коэффициент,  $A \cdot c^{1/2} / m^2$ .

Укажем, что инженерная методика расчета в (1) интеграла Джоуля  $B_k$  и численные значения коэффициента  $C_k$ , соответствующие указанным условиям работы проводов и кабелей в силовых электроэнергетических цепях, для основной КПП приведены в [1]. Найденные по (1) значения сечений  $S_{lmin}$  КПП будут соответствовать тому режиму работы в электроэнергетических цепях проводов и кабелей, когда температура нагрева их токоведущих и изоляционных частей не будет превышать предельно допустимой кратковременной температуры  $\theta_{IS}$  и когда будет обеспечиваться термическая стойкость указанной КПП.

АВП импульсов тока  $i_p(t)$  нано-, микро- и миллисекундного временных диапазонов, генерируемых и используемых в области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) [2] и в других областях современной импульсной слабо- и силовоточной энергетики, электротехники и электроники (например, в оборудовании импульсных электротехнологий и ускорительной техники [3]) для достижения различных научных и технологических целей, обычно не соответствуют АВП переменного тока КЗ в промышленных электроэнергетических цепях. В этой связи практическое применение соотношения (1) для расчетного определения сечений  $S_C$  проводов (кабелей) в слабо- и силовоточных электрических цепях указанной импульсной техники является принципиально невозможным путем. Кроме того, указанный электротехнический подход по выбору в промышленной электроэнергетике сечений  $S_C$  электрических проводов (кабелей) не позволяет определить пороговые амплитуды  $I_{mpk}$  импульсных токов  $i_p(t)$  с различными АВП, при превышении которых в рассматриваемой КПП будет начинаться проявление деструктивных процессов в ее полимерной изоляции. Как известно, явление деструкции такой изоляции, сопровождающееся необратимыми нарушениями ее электроизоляционных свойств, может быть вызвано внешним (внутренним) поражающим или дестабилизирующим воздействием на провода и кабели различных физических факторов (например, протекающего по их токоведущим частям переменного (импульсного) тока, ионизирующего и электромагнитного излучений) [1, 4, 5]. В рамках решаемой нами прикладной задачи рассматривается лишь один дестабилизирующий фактор, обусловленный протекающим по электрическим проводам и кабелям импульсным током  $i_p(t)$  с различными АВП. При определенных (пороговых) значениях  $I_{mpk}$  амплитуды  $I_{mp}$  импульсов тока  $i_p(t)$  той или иной временной формы, протекающих по токоведущим частям (внутренней жиле и наружной оболочке) КПП, из-за интенсивного джоулевого нагрева этих металлических частей проводов (кабелей) могут наступать процессы термической деструк-

ции в их поясной изоляции [1, 6, 7]. Следует заметить, что при значениях амплитуд  $I_{mp}$  импульсных токов  $i_p(t)$  в сотни килоампер деструктивные процессы в полимерной изоляции исследуемой КПП могут возникать также и от действия на кабели (провода) больших электродинамических усилий [2]. На практике важно знать такие пороговые значения  $I_{mpk}$  амплитуд  $I_{mp}$  импульсов тока  $i_p(t)$  различной временной формы, приводящие к нарушению электроизоляционных свойств проводов (кабелей), применяемых в области ВИТ, измерительной техники, электроники, в системах электропитания, контроля, управления работой и диагностики состояния функционирования электротехнических устройств, и снижению их срока службы.

В настоящее время при разработке и создании в мире новых полимерных изоляционных материалов с разнообразным нано- и микроструктурным построением электротехнического и иного (в том числе и медико-биологического) назначения вопросам поведения полимерной изоляции в условиях действия на нее дестабилизирующих (поражающих) физических факторов уделяется повышенное внимание [8-11].

**Целью статьи** является разработка инженерной методики по расчету пороговых амплитуд  $I_{mpk}$  одиночных импульсов тока  $i_p(t)$  различной временной формы для электрических проводов и кабелей с ПЭТ, ПВХ и Р поясной изоляцией, используемых в современной импульсной энергетике, электротехнике и электронике в их слабо- и силовоточных цепях.

**Постановка задачи.** Рассмотрим используемые в электрических цепях ВИТ и другой слабо- и силовоточной электротехники (электроники) изолированные провода и кабели с медными (алюминиевыми) внутренними жилами ( $i=1$ ) и наружными оболочками ( $i=2$ ), имеющие ПЭТ, ПВХ и Р поясную изоляцию [1, 12]. Принимаем, что по круглым сплошным или расщепленным медным (алюминиевым) жилам и оболочкам указанных проводов и кабелей электрических цепей импульсной электротехники (электроники) в их продольном направлении протекают одиночные импульсы тока  $i_p(t)$ , АВП которых могут соответствовать нано-, микро- и миллисекундному временным диапазонам с амплитудами  $I_{mp}$ , изменяющимся в широком диапазоне от 1 А до 1000 кА [2, 3]. Полагаем, что провода и кабели конечной длиной  $l_0$  размещены в окружающей их воздушной среде с температурой, равной  $\theta_0 = 20$  °С [13]. Воспользуемся условием адиабатического характера протекающих при временах действия импульсного аксиального тока  $i_p(t)$  не более 1000 мс в материалах жил (оболочек) исследуемой КПП электротермических процессов, при котором влиянием теплоотдачи с поверхностей их токоведущих частей, имеющих текущую температуру  $\theta_{CS} \geq \theta_0$ , и теплопроводности их электропроводящих материалов и изоляции на джоулев нагрев металлических частей жил (оболочек) проводов (кабелей) пренебрегаем. Считаем, что термическая стойкость проводов (кабелей) цепей ВИТ и другой указанной выше электротехники (электроники) при воздействии на них импульсного тока  $i_p(t)$  лимитируется их предельно допустимой кратковременной температурой нагрева  $\theta_{CS}$ , завися-

щей от степени снижения механической прочности материала жилы (оболочки) и тепловых условий работы изоляции КПП в режиме ее кратковременного нагрева импульсами тока нано-, микро- или миллисекундной длительности, протекающими по их токоведущим частям. Как и в [14] принимаем, что значение температуры  $\theta_{CIS}$  соответствует известной из [1] предельно допустимой кратковременной температуре  $\theta_{IS}$  нагрева проводов и кабелей токами КЗ промышленной частоты. Тогда в соответствии с данными из [1] в электрических слабо- и силовых цепях рассматриваемой электротехники для их изолированных проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (оболочками) и ПВХ (Р) изоляцией величина  $\theta_{CIS}$  будет численно составлять примерно  $\theta_{CIS} \approx 150$  °С, а для их КПП с указанными жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией –  $\theta_{CIS} \approx 120$  °С. Требуется расчетным путем в приближенном виде определить пороговые амплитуды  $I_{mpk}$  одиночных импульсов тока  $i_p(t)$  различных АВП из нано-, микро- и миллисекундного временных диапазонов, протекающих по электрическим проводам и кабелям с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ, ПВХ и Р поясной изоляцией.

**Электротехнический подход к выбору предельно допустимых минимальных сечений  $S_{Cil}$  проводов и кабелей с импульсным током различных АВП.** Для предельно допустимых минимальных сечений  $S_{Cil}$  токоведущих жил (оболочек) исследуемых электрических проводов (кабелей) с импульсным током  $i_p(t)$  произвольных АВП из уравнения их теплового баланса в адиабатическом режиме работы КПП в слабо- и силовых цепях можно получить следующее приближенное расчетное соотношение [14]:

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

где  $J_{CIA} = \int_0^{t_p} i_p^2(t) dt$  – интеграл действия одиночного

импульса тока  $i_p(t)$  с длительностью  $t_p$  его протекания и заданными АВП,  $A^2 \cdot c$ ;  $C_l = (J_{CIS} - J_{CII})^{1/2}$  – постоянный коэффициент,  $A \cdot c^{1/2} / M^2$ ;  $J_{CIS}$ ,  $J_{CII}$  – интегралы тока для токоведущих жил (оболочек) электрических проводов (кабелей) силовых цепей различных электротехнических устройств, предельно допустимая кратковременная и длительно допустимая температуры нагрева материала КПП которых соответствуют принятым выше величинам  $\theta_{IS} = \theta_{CIS}$  и  $\theta_{II}$ ,  $A^2 \cdot c / M^4$ .

Для нахождения численных значений входящих в (2) интегралов тока  $J_{CIS}$  и  $J_{CII}$  могут быть использованы следующие аналитические выражения [14]:

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

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

где  $\gamma_{0i}$ ,  $c_{0i}$ ,  $\beta_{0i}$  – соответственно удельная электропроводность, удельная объемная теплоемкость и тепловой коэффициент удельной электропроводности материала жилы (оболочки) провода (кабеля) электрической цепи до воздействия на рассматриваемую КПП импульсного тока  $i_p(t)$  с произвольными АВП.

В табл. 1 приведены численные значения электрофизических параметров  $\gamma_{0i}$ ,  $c_{0i}$  и  $\beta_{0i}$ , входящих в расчетные соотношения (3) и (4), при комнатной температуре окружающего рассматриваемые электрические провода и кабели воздуха, равной  $\theta_0 = 20$  °С [13].

Таблица 1

Основные электрофизические параметры материала токоведущих жил (оболочек) изолированных проводов и кабелей в слабо- и силовых цепях современной электротехники (электроники) при  $\theta_0 = 20$  °С [13]

Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Численное значение параметра		
	$\gamma_{0i}$ , $10^7 \cdot (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	$c_{0i}$ , $10^6 \cdot \text{Дж} / (\text{м}^3 \cdot \text{°С})$	$\beta_{0i}$ , $10^{-9} \cdot \text{м}^3 / \text{Дж}$
Медь	5,81	3,92	1,31
Алюминий	3,61	2,70	2,14

В табл. 2 приведены рассчитанные по (2) – (4) с учетом количественных данных табл. 1 численные значения коэффициента  $C_l$  для изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией для двух возможных в реальной практике их эксплуатации случаев: случая их предварительной токовой загрузки ( $J_{CII} \neq 0$ ) и случая их полного обесточивания ( $J_{CII} = 0$ ).

Таблица 2

Численные значения коэффициента  $C_l$  для изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в слабо- и силовых цепях современной электротехники (электроники) с нано-, микро- и миллисекундными импульсами тока  $i_p(t)$  различных АВП

Вид изоляции в проводе (кабеле) слабо- и силовых цепей электротехники и электроники	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Численное значение $C_l$ , $10^8 \cdot \text{А} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{М}^2$	
		$J_{CII} = 0$	$J_{CII} \neq 0$
ПВХ, Р	Медь	1,506	1,160
	Алюминий	0,972	0,745
ПЭТ	Медь	1,355	0,957
	Алюминий	0,877	0,616

Что касается расчетного определения в (2) интеграла действия  $J_{CIA}$  одиночного импульса тока  $i_p(t)$  с теми или иными АВП, то вначале рассмотрим случай изменения этого типа электрического тока во времени  $t$  по аperiодическому закону следующего вида [2,15]:

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

где  $\alpha_1 \approx 0,76 / \tau_p$ ,  $\alpha_2 \approx 2,37 / \tau_f$  – коэффициенты формы аperiодического импульса тока с заданными АВП, протекающего в слабо- и силовых цепях ВИТ, импульсной электротехники и электроники;  $k_{p1} = [(a_1/a_2)^m - (a_1/a_2)^n]^{-1}$  – нормирующий коэффициент;  $m = a_1 / (a_2 - a_1)$ ;  $n = a_2 / (a_2 - a_1)$ ;  $\tau_f$ ,  $\tau_p$  – соответственно длительность фронта на уровне  $(0,1 - 0,9) I_{mp}$  и длительность импульса тока на уровне  $0,5 I_{mp}$ ;  $I_{mp}$  – амплитуда протекающего по проводу (кабелю) импульса тока  $i_p(t)$ .

В данном электрофизическом случае выражение для интеграла действия  $J_{CIA}$  протекающего в слабо- и силовых цепях рассматриваемой техники импульса тока  $i_p(t)$  принимает при  $t_p = 3\tau_p$  согласно (2) и (5) следующий приближенный аналитический вид:

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

Далее рассмотрим электрофизический случай, когда изменения во времени  $t$  воздействующего на электрические провода (кабели) указанных цепей электротехники (электроники) импульсного тока  $i_p(t)$  происходят по закону затухающей синусоиды [2, 13]:

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

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  $i_p(t)$  с первой  $I_{mp1}$  и третьей  $I_{mp3}$  амплитудами в цепях электротехники;  $k_{p2} = [\exp(-\Delta_p / 2\pi \operatorname{arccctg} \Delta_p / 2\pi) \sin(\operatorname{arccctg} \Delta_p / 2\pi)]^{-1}$  – нормирующий коэффициент для протекающего в проводе (кабеле) затухающего синусоидального тока  $i_p(t)$ .

Для временной формы (7) изменения в проводе (кабеле) импульса тока  $i_p(t)$  при  $t_p = 3T_p$  в (2) расчетное выражение для интеграла действия  $J_{CiA}$  протекающего в исследуемых слабо- и сильноточных цепях современной электротехники импульса тока  $i_p(t)$  принимает следующий приближенный аналитический вид:

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

Зная из нормативных документов или экспериментальных данных численные значения величин  $I_{mp}$ ,  $I_{mp1}$ ,  $\tau_f$ ,  $\tau_p$ ,  $\Delta_p$  и  $T_p$ , с учетом расчетной оценки значений нормирующих коэффициентов  $k_{p1}$  и  $k_{p2}$  для указанных временных форм изменения импульсного тока  $i_p(t)$  по (2) – (8) могут быть в приближенном виде (с погрешностью не более 5 %) рассчитаны предельно допустимые минимальные сечения  $S_{CiI}$  жил (оболочек) электрических проводов и кабелей, применяемых в цепях ВИТ, силовой электротехники и электроники.

Применительно к решаемой прикладной задаче пороговые значения  $I_{mpk}$  амплитуды  $I_{mp}$  импульса тока  $i_p(t)$  заданной временной формы будут соответствовать предельно допустимой кратковременной температуре нагрева  $\theta_{CIS} = \theta_{IS}$  этим импульсным током  $i_p(t)$  электрического провода и кабеля с выбранной изоляцией. Поэтому из (2) с учетом (6), (8) и данных табл. 2 при выполнении соотношения  $S_{Ci} = S_{CiI}$  могут быть в рассматриваемом приближении определены и расчетные пороговые значения  $I_{mpk}$  амплитуд  $I_{mp}$  и  $I_{mp1}$  импульсов аксиального тока  $i_p(t)$  для указанных согласно (5) и (7) временных форм, протекающих по исследуемым изолированным проводам и кабелям в слабо- и сильноточных цепях электротехники и электроники.

**Расчетная оценка пороговых амплитуд  $I_{mpk}$  импульсов тока  $i_p(t)$  различных АВП для электрических проводов и кабелей.** В соответствии с приведенными выражениями (2), (5) и (6) для порогового значения  $I_{mpk}$  амплитуды  $I_{mp}$  аperiodического (униполярного) импульса аксиального тока  $i_p(t)$ , воздействующего на токоведущие и изоляционные части исследуемых электрических проводов (кабелей), при условии  $S_{Ci} = S_{CiI}$  можно получить следующее приближенное расчетное аналитическое соотношение:

$$I_{mpk} \approx S_{Ci} C_l k_{p1}^{-1} [0,658\tau_p - 0,633\tau_f]^{-1/2}. \quad (9)$$

Из (9) видно, что при заданных временных параметрах фронта  $\tau_f$  и длительности  $\tau_p$  импульса тока  $i_p(t)$ , известных конструктивных характеристиках проводов и кабелей (значениях их сечений  $S_{Ci}$ ) и выбранном

режиме работы КПП с исследуемой полимерной изоляцией и указанными материалами ее жил и оболочек (известном значении коэффициента  $C_l$  согласно данных табл. 2) нахождение искомого значения амплитуды  $I_{mpk}$  будет сводиться к определению по (5) численного значения нормирующего коэффициента  $k_{p1} > 1$ .

Из (2), (7) и (8) при условии  $S_{Ci} = S_{CiI}$  для порогового значения  $I_{mpk}$  первой амплитуды  $I_{mp1}$  затухающего синусоидального импульсного тока  $i_p(t)$  в изолированном проводе и кабеле вытекает следующее приближенное расчетное аналитическое выражение:

$$I_{mpk} \approx S_{Ci} C_l k_{p2}^{-1} [T_p (4\Delta_p)^{-1} - \Delta_p T_p (4\Delta_p^2 + 16\pi^2)^{-1}]^{-1/2}. \quad (10)$$

Аналогично (9) нахождение по (10) расчетного значения  $I_{mpk}$  для того или иного провода (кабеля) с известными характеристиками  $S_{Ci}$  и  $C_l$  (см. табл. 2) при заданных временных параметрах  $\Delta_p$  и  $T_p$  для протекающего по КПП разрядного импульсного тока  $i_p(t)$  будет фактически сводиться к расчету по (7) численного значения нормирующего коэффициента  $k_{p2} \geq 1$ .

Согласно (9) и (10) пороговые значения  $I_{mpk}$  амплитуд  $I_{mp}$  аperiodических и затухающих синусоидальных импульсов тока  $i_p(t)$  прямо пропорциональны поперечным сечениям  $S_{Ci}$  металлических жил (оболочек) исследуемых электрических проводов и кабелей. Кроме того, искомые значения  $I_{mpk}$  фактически обратно пропорциональны временным параметрам  $\tau_p^{1/2}$  и  $T_p^{1/2}$  для протекающих по КПП импульсов тока  $i_p(t)$ .

Отметим, что расчетные соотношения (9) и (10) для определения пороговых значений  $I_{mpk}$  амплитуд  $I_{mp}$  импульсов аксиального тока  $i_p(t)$ , изменяющихся во времени  $t$  согласно (5) и (7) по аperiodической зависимости и закону экспоненциально затухающей синусоиды, охватывают широкую номенклатуру временных форм и АВП применяемых в электрофизической практике одиночных импульсов тока  $i_p(t)$ , протекающих по токоведущим частям проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭТ поясной изоляцией в современной импульсной энергетике, электротехнике и электронике.

В слабо- и сильноточных цепях рассматриваемой энергетике, электротехнике и электронике с используемыми по (5) и (7) временными формами протекающих по их КПП импульсов тока  $i_p(t)$  при  $I_{mp} > I_{mpk}$  тепловой перегрев токоведущих частей проводов и кабелей будет приводить к разрушению их изоляции, снижающей рабочий ресурс используемой в них КПП.

**Расчетная оценка температуры нагрева  $\theta_{Ci}$  электрических проводов и кабелей импульсами тока  $i_p(t)$  различных АВП.** С целью расчетной верификации приведенных формул (9) и (10) для выбора в рассматриваемой КПП пороговых амплитуд  $I_{mpk}$  импульсного тока выполним оценку температуры  $\theta_{Ci}$  Джоулева нагрева токоведущих частей кабелей (проводов), по которым протекают одиночные импульсы тока  $i_p(t)$  с заданными АВП. Для этого используем известную нелинейную зависимость удельной электропроводности  $\gamma_{0i}$  материала жилы (оболочки) провода (кабеля) от его текущей температуры  $\theta_{Ci}$  [13]:

$$\gamma_{0i} \approx \gamma_{20i} [1 + c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{Ci} - \theta_0)]^{-1}, \quad (11)$$

где  $\gamma_{20i}$  – удельная электропроводность  $\gamma_{0i}$  проводникового материала токоведущих частей КПП при тем-

температуре окружающего его воздуха  $\theta_{Ci} = \theta_0 = 20^\circ\text{C}$  (для меди и алюминия эти значения  $\gamma_{20i}$  указаны в табл. 1).

Для применяемых в КПП импульсной энергетики, электротехники и электроники основных металлов формула (11) описывает температурные изменения их параметра  $\gamma_{0i}$  с погрешностью не более  $\pm 5\%$  [13].

С учетом (11) и данных из [13] решение неоднородного дифференциального уравнения теплопроводности применительно к металлическим частям исследуемых кабелей (проводов) принятой длиной  $l_0$  с импульсным током  $i_p(t)$  различных АВП для текущей температуры  $\theta_{Ci}$  их джоулевого нагрева указанным током при начальном условии  $[\theta_{Ci}(t=0) - \theta_0] = 0$  может быть записано в следующем приближенном виде:

$$\theta_{Ci} \approx \theta_0 + (c_{0i}\beta_{0i})^{-1} [\exp(J_{CiA}\gamma_{20i}^{-1}\beta_{0i}/S_{Ci}^2) - 1]. \quad (12)$$

Из (12) следует, что текущая температура  $\theta_{Ci}$  нагрева импульсным током  $i_p(t)$  различных АВП токоведущих жил (оболочек) рассматриваемой КПП обратно пропорциональна удельной объемной теплоемкости  $c_{0i}$  (теплоемкости на единицу объема металла) их проводниковых материалов, которая для большинства металлов в твердой фазе изменяется в зависимости от их температуры в пределах  $\pm 10\%$  от своего усредненного численного значения [13]. Укажем, что для теплофизического параметра  $c_{0i}$  выполняется равенство вида [13]:  $c_{0i} = c_{pi}\rho_i$ , где  $c_{pi}$  – теплоемкость на единицу массы однородного проводникового материала КПП (Дж/кг·°C) с его плотностью  $\rho_i$  (кг/м<sup>3</sup>). Поэтому в исследуемом электрофизическом случае можно говорить о том, что габаритные показатели КПП (кроме сечения  $S_{Ci}$  ее жил и оболочек) при заданных АВП протекающих по ее металлическим частям импульсов тока  $i_p(t)$  на нагрев кабелей (проводов) не влияют. В этом тепловом процессе принимают участие согласно (12) в основном удельные теплофизические параметры КПП ( $\gamma_{0i}$ ,  $c_{0i}$  и  $\beta_{0i}$ ) и АВП импульсного тока  $i_p(t)$  [13]. Для коротких (с крайне малыми значениями  $\tau_p$  и  $T_p$ ) импульсов тока  $i_p(t)$  зона нагрева КПП будет локализовываться в очень тонких слоях ее металлических жил и оболочек. С учетом принятых допущений и (12) можно заключить, что в рассматриваемом адиабатическом приближении длина  $l_0$  кабеля (провода) и соответственно общая масса металлических частей КПП при  $t \leq 3\tau_p$  или  $t \leq 3T_p$  заметного влияния на температуру импульсного нагрева  $\theta_{Ci}$  этих частей КПП не оказывает. Данное влияние на уровень температуры  $\theta_{Ci}$  будет усиливаться после прохождения рассматриваемых импульсов тока  $i_p(t)$  по токоведущим частям КПП, когда за счет теплопроводности их металла начнется выравнивание температуры по толщине этих частей.

В случае, когда для токоведущих металлических частей рассматриваемых кабелей и проводов выполняется соотношение  $S_{Ci} = S_{Cil}$ , с учетом (2) выражение (12) упрощается и приобретает следующий вид:

$$\theta_{Ci} \approx \theta_0 + (c_{0i}\beta_{0i})^{-1} [\exp(\gamma_{20i}^{-1}\beta_{0i}C_l^2) - 1], \quad (13)$$

где  $C_l$  – постоянный коэффициент, численные значения которого для рассматриваемой полимерной изоляции кабелей (проводов) и указанных режимов работы их электрических цепей приведены в табл. 2.

Соотношение (13) можно как раз и использовать при расчетной верификации полученных выражений (9) и (10) для нахождения численных значений пороговых амплитуд  $I_{mpk}$  импульсного тока  $i_p(t)$  в рассматриваемой КПП. Согласно принятым нами условиям при  $S_{Ci} = S_{Cil}$  расчетная по (13) температура  $\theta_{Ci}$  нагрева токоведущих частей исследуемой КПП не должна превышать принятой нормированной предельно допустимой кратковременной температуры  $\theta_{CIS}$  для нее.

**Примеры расчета пороговых амплитуд  $I_{mpk}$  импульсов тока  $i_p(t)$  нано-, микро- и миллисекундных временных диапазонов.** В качестве исследуемой КПП выберем короткий радиочастотный коаксиальный среднегабаритный кабель со сплошной ПЭТ изоляцией марки РК 50-4-11 [12], имеющий при  $l_0 \leq 10$  м круглую сплошную медную жилу диаметром 1,37 мм ( $S_{C1} \approx 1,474$  мм<sup>2</sup>) и медную луженую плетеную оболочку (оплетку с плотностью повива не менее 95 %) внутренним диаметром 4,6 мм и толщиной стенки 0,15 мм ( $S_{C2} \approx 2,059$  мм<sup>2</sup>). Принимаем, что данный кабель размещен в воздушной атмосфере при комнатной температуре  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  с выполнением условия для интеграла тока  $J_{CII} = 0$  в его электрической цепи (без предварительной токовой загрузки кабеля при  $\theta_{II} = \theta_0$ ). Из приведенных конструкционных данных видно, что медная жила выбранного радиочастотного кабеля марки РК 50-4-11 поперечным сечением  $S_{C1} \approx 1,474$  мм<sup>2</sup> по сравнению с его обратным наружным токопроводом (медной оплеткой поперечным сечением  $S_{C2} \approx 2,059$  мм<sup>2</sup>) будет являться менее стойкой к электротермическому действию продольно протекающего по ним в противоположных направлениях импульса тока  $i_p(t)$  с заданными АВП. Пусть протекающий по токонесущим частям принятого коаксиального кабеля одиночный импульс тока  $i_p(t)$  имеет аperiodическую временную форму. Поэтому указанная жила кабеля марки РК 50-4-11 может являться внутренним локальным очагом перегрева токонесущих частей данного кабеля. В этой связи прилегающая к медной жиле радиочастотного кабеля марки РК 50-4-11 сплошная поясная ПЭТ изоляция может испытывать воздействие повышенных уровней температурного поля, вызванного джоулевым нагревом этой медной жилы протекающим по ней принятым импульсом тока  $i_p(t)$ . Именно медная жила и прилегающая к ней цилиндрическая зона ПЭТ изоляции принятого в прикладных расчетах значений  $I_{mpk}$  радиочастотного кабеля будут являться слабыми «звеньями» в возможной цепочке деструктивных процессов в рассматриваемом кабеле. С учетом вышеизложенного можно заключить, что расчетную оценку пороговых значений  $I_{mpk}$  амплитуды  $I_{mp}$  используемого импульса тока  $i_p(t)$  заданной временной формы для радиочастотного кабеля марки РК 50-4-11 следует привязать к электротермическому состоянию однопроволочной круглой медной жилы ( $S_{C1} \approx 1,474$  мм<sup>2</sup>) этого кабеля, испытывающей тепловое воздействие аperiodического импульса тока  $i_p(t)$ .

1. Вначале используем стандартный наносекундный импульс тока временной формы  $\tau_f/\tau_p = 5$  нс/200 нс, применявшийся в ряде стран при имитации в разрядных сильноточных электрических цепях ВИТ с воздушными многопроводными системами полеобразо-

вания и соответственно в их рабочих воздушных объемах с испытываемыми на электромагнитную совместимость (стойкость) техническими объектами различных габаритных размеров мощного электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва [4, 16]. Из (5) находим, что для данного расчетного случая коэффициенты формы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  наносекундного 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 для данной временной формы униполярного импульса тока  $i_p(t)$  нормирующий коэффициент  $k_{p1}$  по (5) оказывается примерно равным  $k_{p1} \approx 1,049$ . Тогда из (9) при  $k_{p1} \approx 1,049$ ,  $C_f = 1,355 \cdot 10^8 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{м}^2$  (см. соответствующие данные в табл. 2) и  $S_{C1} = S_{C1} = 1,474 \text{ мм}^2$  (сечение медной жилы кабеля) для порогового численного значения  $I_{mpk}$  амплитуды  $I_{mp}$  рассматриваемого аperiodического импульса тока  $i_p(t)$  временной формы  $\tau_f/\tau_p = 5 \text{ нс}/200 \text{ нс}$  применительно к радиочастотному коаксиальному кабелю марки РК 50-4-11 находим, что  $I_{mpk} \approx 531,2 \text{ кА}$ .

2. Далее рассмотрим стандартный микросекундный аperiodический импульс тока  $i_p(t)$  временной формы  $\tau_f/\tau_p = 10 \text{ мкс}/350 \text{ мкс}$ , используемый сейчас в соответствии с требованиями действующего международного стандарта IEC 62305-1-2010 [17] при испытаниях силового электроэнергетического оборудования на стойкость к прямому действию на него мощных коротких грозных электрических разрядов [18]. Из формулы (9) при  $k_{p1} \approx 1,054$  ( $\alpha_1 \approx 2,17 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ;  $\alpha_2 \approx 2,37 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ ),  $C_f = 1,355 \cdot 10^8 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{м}^2$  и сечении сплошной медной жилы  $S_{C1} = S_{C1} = 1,474 \text{ мм}^2$  исследуемого нами радиочастотного кабеля марки РК 50-4-11 для порогового численного значения  $I_{mpk}$  амплитуды  $I_{mp}$  рассматриваемого аperiodического импульса аксиального тока  $i_p(t)$  временной формы  $\tau_f/\tau_p = 10 \text{ мкс}/350 \text{ мкс}$  в принятом кабеле находим, что  $I_{mpk} \approx 12,66 \text{ кА}$ .

3. В завершении примеров прикладных расчетов пороговых амплитуд  $I_{mpk}$  для КПП используем стандартный миллисекундный аperiodический импульс тока  $i_p(t)$  временной формы  $\tau_f/\tau_p = 7 \text{ мс}/160 \text{ мс}$ , применяемый ныне согласно требований действующего нормативного документа США SAE ARP 5412: 2013 [19] при натурных электромагнитных испытаниях основных узлов и систем авиационной техники на молниестойкость к прямому воздействию на них длительной компоненты тока искусственной молнии [20]. Для этого импульса тока  $i_p(t)$  в соответствии с (9) при  $k_{p1} \approx 1,078$  ( $\alpha_1 \approx 4,75 \text{ с}^{-1}$ ;  $\alpha_2 \approx 3,38 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ ),  $C_f = 1,355 \cdot 10^8 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{м}^2$  и заданном поперечном сечении медной жилы  $S_{C1} = S_{C1} = 1,474 \text{ мм}^2$  радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-4-11 следует, что пороговое численное значение  $I_{mpk}$  амплитуды  $I_{mp}$  указанного импульса аксиального тока  $i_p(t)$  временной формы  $\tau_f/\tau_p = 7 \text{ мс}/160 \text{ мс}$  для него будет равным около  $I_{mpk} \approx 1,84 \text{ кА}$ .

Одним из показателей достоверности используемого нами электротехнического подхода и полученного на его основе приближенного расчетного соотношения (9), примененного в приведенных выше примерах определения пороговых значений  $I_{mpk}$  амплитуд  $I_{mp}$  униполярных импульсов тока  $i_p(t)$  нано-, микро- и миллисекундной длительности для радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-4-11, является то, что выполнение по формуле (13) приме-

нительно к этим практическим случаям нахождения численных значений  $I_{mpk}$  оценочного расчета температуры нагрева  $\theta_{Ci}$  (при  $\theta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $J_{Cu} = 0$ ) круглой сплошной медной жилы указанного кабеля приводит к результату, равному  $\theta_{Ci} \approx 119,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Видно, что расчетный уровень температуры  $\theta_{Ci}$  джоулевого нагрева КПП в исследуемых случаях не превышает предельно допустимой кратковременной температуры  $\theta_{Cis} \approx 120 \text{ }^\circ\text{C}$ , характерной для электрических кабелей с ПЭТ изоляцией.

#### Выводы.

1. Разработана инженерная методика по приближенному расчетному определению пороговых амплитуд  $I_{mpk}$  одиночных импульсов аксиального тока  $i_p(t)$  различной временной формы для электрических проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) токоведущими частями и ПЭТ, ПВХ и Р поясной изоляцией, используемых в слабо- и силовых цепях импульсной энергетики, электротехники и электроники. В основу этой методики была положена электротехническая стойкость полимерной изоляции рассматриваемой КПП, соответствующая предельно допустимым кратковременным температурам нагрева токоведущих и изоляционных частей ее проводов и кабелей и не допускающая наступления явления термической деструкции в поясной изоляции КПП.

2. Получены расчетные аналитические соотношения (9) и (10) для нахождения в исследуемой КПП пороговых численных значений  $I_{mpk}$  амплитуд  $I_{mp}$  импульсов тока  $i_p(t)$ , изменяющихся во времени  $t$  по аperiodической зависимости и по закону экспоненциально затухающей синусоиды. Показано, что при  $I_{mp} > I_{mpk}$  из-за теплового перегрева токоведущих частей рассматриваемых проводов и кабелей будет наступать деструкция их поясной изоляции, приводящая к снижению рабочего ресурса и срока службы КПП.

3. Приведены примеры практического применения предлагаемой инженерной методики по расчетному определению для радиочастотного коаксиального среднегабаритного кабеля марки РК 50-4-11 со сплошной ПЭТ поясной изоляцией пороговых амплитуд  $I_{mpk}$  стандартных аperiodических импульсов тока  $i_p(t)$  из нано-, микро- и миллисекундных временных диапазонов формы  $\tau_f/\tau_p = 5 \text{ нс}/200 \text{ нс}$ ,  $\tau_f/\tau_p = 10 \text{ мкс}/350 \text{ мкс}$  и  $\tau_f/\tau_p = 7 \text{ мс}/160 \text{ мс}$ . Установлено, что с соответствующим возрастанием параметра  $\tau_p \gg \tau_f$  для протекающих по круглой сплошной медной жиле и полый расщепленной луженой медной оплетке данного кабеля указанных униполярных одиночных импульсов тока  $i_p(t)$  происходит существенное уменьшение их пороговых амплитуд  $I_{mpk}$  (с 531,2 кА для наносекундного импульса тока вида 5 нс/200 нс до 1,84 кА для миллисекундного импульса тока вида 7 мс/160 мс).

**Фінансування.** Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (тема ДБ № 0121U109546).

**Конфлікт інтересів.** Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, Кн. 1 / Под общей ред. И.Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.

2. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуропат П.И., Шнеерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.

3. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

4. 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.

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

6. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. – Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. – 550 с.

7. Пугач В.Н., Поляков Д.А., Никитин К.И., Терещенко Н.А., Комаров И.В. Исследование влияния термической деструкции на срок службы изоляции кабелей. *Омский научный вестник*, 2019, №6 (168), С. 70-74. doi: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-168-70-74>.

8. Miller-Chou B.A., Koenig J.L. A review of polymer dissolution. *Progress in Polymer Science*, 2003, vol. 28, no. 8, pp. 1223-1270. doi: [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(03\)00045-5](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(03)00045-5).

9. Brzeziński M., Wedepohl S., Kost B., Calderón M. Nanoparticles from supramolecular poly lactides overcome drug resistance of cancer cells. *European Polymer Journal*, 2018, vol. 109, pp. 117-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.08.060>.

10. Schulte R., Ostwald R., Menzel A. Gradient-Enhanced Modelling of Damage for Rate-Dependent Material Behaviour – A Parameter Identification Framework. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 14, p. 3156. doi: <https://doi.org/10.3390/ma13143156>.

11. Spirescu V.A., Chircov C., Grumezescu A.M., Andronescu E. Polymeric Nanoparticles for Antimicrobial Therapies: An up-to-date Overview. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 5, p. 724. doi: <https://doi.org/10.3390/polym13050724>.

12. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.

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

14. 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: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1775-2>.

15. 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: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.1.06>.

16. Гуревич В.И. Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и защита электрооборудования от него: монография. – М.: Инфра-Инженерия, 2019. – 516 с.

17. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, IEC Publ., 2010. Режим доступа: [https://cs.spz-bc.com.ua/-/Du44pi68kxwVNIVLm0wh0g/sv/document/4b/f8/7c/437461/255/IEC-62305-1\\_v1\\_LO.pdf?1559637095](https://cs.spz-bc.com.ua/-/Du44pi68kxwVNIVLm0wh0g/sv/document/4b/f8/7c/437461/255/IEC-62305-1_v1_LO.pdf?1559637095) (Дата звернення: 25.05.2021).

18. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10/350  $\mu$ s with an amplitude of  $\pm(100-200)$  kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol. 58, no. 6, pp. 745-750. doi: <https://doi.org/10.1134/s0020441215060032>.

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

Режим доступу: <https://www.sae.org/standards/content/arp5412b> (Дата звернення: 25.05.2021).

20. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 4, pp. 45-53. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.4.08>.

#### REFERENCES

1. 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).

2. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinsky G.S., Nikolayevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej* [The technique of large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).

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

4. 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).

5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. *Obespechenie stoikosti apparatury svyazi k ioniziruyushchim i elektromagnitnym izlucheniyam* [Providing of resistibility of apparatus of connection to the ionizing and electromagnetic radiations]. Moscow, Radio and Connection Publ., 1988. 296 p. (Rus).

6. Shidlovskiy A.K., Shcherba A.A., Zolotaryov V.M., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. *Kabeli s polimernoy izolyatsiey na sverhvyssokie napryazheniya* [Cables with a polymeric isolation on over-voltage]. Kyiv, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine Publ., 2013. 550 p. (Rus).

7. Pugach V.N., Polyakov D.A., Nikitin K.I., Tereshchenko N.A., Komarov I.V. Research of temperature destruction effect on cables insulation operation life. *Omsk Scientific Bulletin*, 2019, no. 6 (168), pp. 70-74. (Rus). doi: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-168-70-74>.

8. Miller-Chou B.A., Koenig J.L. A review of polymer dissolution. *Progress in Polymer Science*, 2003, vol. 28, no. 8, pp. 1223-1270. doi: [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(03\)00045-5](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(03)00045-5).

9. Brzeziński M., Wedepohl S., Kost B., Calderón M. Nanoparticles from supramolecular poly lactides overcome drug resistance of cancer cells. *European Polymer Journal*, 2018, vol. 109, pp. 117-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.08.060>.

10. Schulte R., Ostwald R., Menzel A. Gradient-Enhanced Modelling of Damage for Rate-Dependent Material Behaviour – A Parameter Identification Framework. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 14, p. 3156. doi: <https://doi.org/10.3390/ma13143156>.

11. Spirescu V.A., Chircov C., Grumezescu A.M., Andronescu E. Polymeric Nanoparticles for Antimicrobial Therapies: An up-to-date Overview. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 5, p. 724. doi: <https://doi.org/10.3390/polym13050724>.

12. Belorussov N.I., Saakjan A.E., Jakovleva A.I. *Elektricheskie kabeli, provoda i shnury. Spravochnik* [Electrical cables, wires and cords. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 536 p. (Rus).

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

14. 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: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1775-2>.

15. 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: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.1.06>.

16. Gurevich V.I. *Elektromagnitnyi impul's vysokogo iadernogo vzryva i zashchita elektrooborudovaniia ot nego: monografiia* [Electromagnetic impulse of high-altitude nuclear explosion and protection of electrical equipment from it: monograph]. Moscow, Infra-Engineering Publ., 2019. 516 p. (Rus).

17. IEC 62305-1: 2010. *Protection against lightning. Part 1: General principles*. Geneva, IEC Publ., 2010. Available at: [https://cs.spz-bc.com.ua/-/Du44pi68kxwVNIVLm0wh0g/sv/document/4b/f8/7c/437461/255/IEC-62305-1\\_v1\\_LQ.pdf?1559637095](https://cs.spz-bc.com.ua/-/Du44pi68kxwVNIVLm0wh0g/sv/document/4b/f8/7c/437461/255/IEC-62305-1_v1_LQ.pdf?1559637095) (accessed 25 May 2021).

18. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10/350  $\mu$ s with an amplitude of  $\pm(100-200)$  kA. *Instruments and Experimental Techniques*, 2015, vol. 58, no. 6, pp. 745-750. doi: <https://doi.org/10.1134/s0020441215060032>.

19. SAE ARP 5412: 2013. *Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms*. SAE Aerospace, USA, 2013, pp. 1-56. Available at: <https://www.sae.org/standards/content/arp5412b> (accessed 25 May 2021).

20. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 4, pp. 45-53. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.4.08>.

Надійшла (Received) 12.10.2021

Прийнята (Accepted) 15.11.2021

Опублікована (Published) 03.12.2021

Баранов Михайло Іванович<sup>1</sup>, д.т.н., гол.н.с.,  
Буряковський Сергій Геннадійович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Князев Володимир Володимирович<sup>1</sup>, к.т.н., пров.н.с.,  
<sup>1</sup> Науково-дослідний

та проектно-конструкторський інститут «Молнія»  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»,  
61013, Харків, вул. Шевченка, 47,  
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua (Corresponding Author),  
sergbyr@i.ua, knyaz2@i.ua

M.I. Baranov<sup>1</sup>, S.G. Buriakovskiy<sup>1</sup>, V.V. Kniaziev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research and Design Institute «Molniya» of  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

**Destruction of polymeric isolation and threshold amplitudes of impulses of current of different temporal form for electric wires and cables in the weak- and heavy-current chains of devices of impulsive energy, electrical engineering and electronics.**

**Goal.** Development of engineering method upon settlement of threshold amplitudes of  $I_{mpk}$  of single-pulse of current of  $i_p(t)$  of different temporal form for electric wires and cables with a polyethylene (PET), polivinylchloride (PVKH) and rubber (R) half-length isolation, in-use in modern impulsive energy, electri-

cal engineering and electronics in their weak- and heavy-current chains. **Methodology.** Basis of the theoretical and applied electrical engineering, electroenergy, electrophysics bases of technique of high-voltage and large impulsive currents, bases of weak- and heavy-current electronics, measuring technique, electromagnetic compatibility and standardization. **Results.** Development of engineering method is executed on close calculation determination of threshold amplitudes of  $I_{mpk}$  of single-pulse of axial-flow current of  $i_p(t)$  of different temporal form for electric wires and cables with copper (aluminium) current-carrying parts and PET, PVKH and R by a half-length isolation, in-use in the weak- and heavy-current chains of impulsive energy, electrical engineering and electronics. Electro-thermal resistibility of half-length isolation of the examined cable-explorer production (CEP), proper maximum to the possible brief temperatures of heating of current-carrying and isolating parts of the probed wires and cables and shutting out the offensive of the phenomenon destruction in the indicated isolation of CEP, was fixed in basis of this method. Calculation analytical correlations are got for finding in probed CEP of threshold numeral values of  $I_{mpk}$  of amplitudes of  $I_{mp}$  of impulses of current of  $i_p(t)$ , time-varying  $t$  both on aperiodic dependence of type of  $\tau_f/\tau_p$  with duration of their front of  $\tau_f$  and duration of their impulses of  $\tau_p$  and by law of exponential attenuation sinewave. It is retined that at  $I_{mp} > I_{mpk}$  destruction of their half-length isolation, resulting in the decline of working resource and term of service of CEP, will come from the thermal overheat of current-carrying parts of the examined electric wires and cables. The examples of practical application of the offered method are resulted upon settlement for a radio frequency coaxial cable RC 50-4-11 with middle sizes is easily soiled with continuous PET by the isolation of threshold amplitudes of  $I_{mpk}$  of standard aperiodic impulses of current of  $i_p(t)$  from nano-, micro- and millisecond temporal ranges of form of  $\tau_f/\tau_p = 5$  ns/200 ns,  $\tau_f/\tau_p = 10$   $\mu$ s/350  $\mu$ s and  $\tau_f/\tau_p = 7$  ms/160 ms. It is set that with the proper growth of parameter of  $\tau_p \gg \tau_f$  for flowings on a continuous copper tendon and split copper shell of radio frequency coaxial cable RC 50-4-11 with middle sizes is easily soiled indicated homopolar impulses of current of  $i_p(t)$  take a place substantial diminishing of their threshold amplitudes of  $I_{mpk}$  (with 531,2  $\mu$ A for the nanosecond impulse of current of type of 5 ns/200 ns to 1,84  $\mu$ A for the millisecond impulse of current of type of 7 ms/160 ms). **Originality.** An engineering method is first developed upon close settlement of threshold numeral values of  $I_{mpk}$  of amplitudes of  $I_{mp}$  of single-pulse of axial-flow current of  $i_p(t)$  of arbitrary peak-temporal parameters for electric wires and cables with copper (aluminium) current-carrying parts and PET, PVKH and R by a half-length isolation. **Practical value.** Application in electrical engineering practice of the offered engineering method on determination of threshold amplitudes of  $I_{mpk}$  of the indicated impulses of axial-flow current of  $i_p(t)$  for the probed electric wires and cables will allow considerably to increase a working resource and term of service of examined CEP. References 20, tables 2.

**Key words:** electric wires and cables with a polymeric isolation, electro-thermal resistibility of cable-explorer production, destruction of isolation, threshold amplitudes of impulses of current for wires and cables.