

М.И. Баранов

## ВЫБОР КРИТИЧЕСКИХ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

*Надані результати розробленого електротехнічного підходу до розрахункового вибору по умові електричного вибуху (ЕВ) струмопровідних частин кабельно-провідникової продукції критичних перерізів  $S_{Ci}$  неізолюваних дротів, а також ізолюваних дротів і кабелів з полівінілхлоридною (ПВХ), гумовою (Г) і поліетиленовою (ПЕТ) ізоляцією з мідними (алюмінієвими) жилами (оболонками), по яких в силових колах електрообладнання загальнопромислового призначення в аварійному режимі протікає струм  $i_k(t)$  короткого замикання (КЗ) із заданими амплітудно-часовими параметрами (АЧП). На підставі даного підходу здійснений реальний вибір критичних перерізів  $S_{Ci}$  для вказаних дротів (кабелів) силових кіл електрообладнання, що розглядається. Виконана розрахункова чисельна оцінка критичних амплітуд щільностей  $\delta_{Ci}$  струму  $i_k(t)$  КЗ із заданими АЧП в дротах і кабелях силових кіл вказаного електрообладнання. Отримані дані сприятимуть забезпеченню термічної стійкості електричних неізолюваних дротів, а також дротів і кабелів з ПВХ, Г і ПЕТ ізоляцією, які широко застосовуються в силових колах електрообладнання загальнопромислового призначення. Бібл. 8, табл. 5.*

*Ключові слова:* промислова електроенергетика, електрообладнання, електричні дроти і кабелі кіл електрообладнання, розрахунковий вибір критичних перерізів дротів і кабелів в колах електрообладнання.

*Приведены результаты разработанного электротехнического подхода к расчетному выбору по условию электрического взрыва (ЭВ) токонесущих частей кабельно-проводниковой продукции критических сечений  $S_{Ci}$  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 силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения в аварийном режиме протекает ток  $i_k(t)$  короткого замыкания (КЗ) с заданными амплитудно-временными параметрами (АВП). На основании данного подхода осуществлен реальный выбор критических сечений  $S_{Ci}$  для указанных проводов (кабелей) силовых цепей рассматриваемого электрооборудования. Выполнена расчетная численная оценка критических амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  тока  $i_k(t)$  КЗ с заданными АВП в проводах и кабелях силовых цепей указанного электрооборудования. Полученные данные будут способствовать обеспечению термической стойкости электрических неизолированных проводов, а также проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, широко применяемых в силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения. Библ. 8, табл. 5.*

*Ключевые слова:* промышленная электроэнергетика, электрооборудование, электрические провода и кабели цепей электрооборудования, расчетный выбор критических сечений проводов и кабелей в цепях электрооборудования.

**Введение.** В [1] были приведены результаты расчетно-экспериментального определения критических сечений  $S_{Ci}$  и критических амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  тока для не- и изолированных электрических проводов (кабелей), содержащих металлические жилы ( $i=1$ ) и оболочки ( $i=2$ ) и используемых в разрядных цепях высоковольтной сильноточной импульсной техники. В основу такого выбора величин сечений  $S_{Ci}$  токопроводящих жил (оболочек) и амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  тока для кабельно-проводниковой продукции (КПП) с импульсным аксиальным током, изменяющимся в нано-, микро- и миллисекундном временных диапазонах, было положено известное в электрофизике условие электрического взрыва (ЭВ) [2, 3] металлических жил (оболочек) указанных проводов и кабелей, приводящего к сублимации их токонесущих частей и выходу КПП из строя. В области промышленной электроэнергетики в аварийных режимах работы силовых цепей ее электрооборудования, сопровождающихся протеканием по токонесущим частям КПП тока  $i_k(t)$  короткого замыкания (КЗ) частотой  $f=50$  Гц и амплитудой до (40-125) кА [4], при необоснованном использовании в силовых цепях электрооборудования КПП также возможны случаи наступления явления ЭВ медных (алюминиевых) жил и оболочек (обратных токопроводов) их проводов и кабелей. Таким аварийным режимам в силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения с подобными тяже-

лыми последствиями для их КПП электротехниками и энергетиками было уделено недостаточное внимание. В этой связи расчетное определение критических поперечных сечений  $S_{Ci}$  электрических проводов (кабелей), используемых в силовых цепях электрооборудования общепромышленного применения, является в области энергетики актуальной прикладной задачей.

**Целью статьи** является выполнение приближенного расчетного определения критических сечений  $S_{Ci}$  и критических амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  переменного тока частотой  $f=50$  Гц в проводах и кабелях силовых цепей электрооборудования промышленной электроэнергетики, характеризующихся протеканием по ним в аварийных режимах тока  $i_k(t)$  КЗ с заданными амплитудно-временными параметрами (АВП).

**1. Постановка задачи.** Рассмотрим широко используемые в силовых электрических цепях электрооборудования общепромышленного назначения неизолированные медные и алюминиевые провода, а также изолированные провода и кабели с медными (алюминиевыми) внутренними жилами и наружными оболочками-токопроводами с исходной удельной электропроводностью  $\gamma_{0i}$  их немагнитного материала, имеющие поливинилхлоридную (ПВХ), резиновую (Р) и полиэтиленовую (ПЭТ) поясную изоляцию [4, 5]. Принимаем, что по круглым сплошным или расщепленным медным (алюминиевым) жилам (оболочкам) указан-

© М.И. Баранов

ных проводов и кабелей силовых электрических цепей рассматриваемого электрооборудования в аварийном режиме в их продольном направлении протекает ток  $i_k(t)$  трехфазного КЗ с заданными АВП. Укажем, что именно данный вид тока КЗ является расчетным аварийным током для исследуемого электрооборудования [4]. Полагаем, что рассматриваемые провода и кабели размещены в окружающей воздушной среде, температура которой соответствует комнатной и равной  $\theta_0=20$  °С [2, 4]. Данной температуре соответствует и приведенная выше величина удельной электропроводности  $\gamma_{0i}$  материала жилы (оболочки) КПП. Считаем, что рассматриваемые провода (кабели) до воздействия на их токонесущие части тока  $i_k(t)$  КЗ с заданными АВП могут быть как обесточены, так и находиться под номинальной токовой нагрузкой. В этой связи первоначальная температура  $\theta_{0i}$  материала токонесущих частей КПП в зависимости от токового режима работы силовых цепей электрооборудования может соответствовать величине  $\theta_0=20$  °С или величине длительно допустимой температуре  $\theta_{li}$  нагрева их материала. Известно, что для не- и изолированных проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией величина температуры  $\theta_{li}$  численно не превышает регламентируемых действующими требованиями уровней в 70 и 65 °С соответственно [4, 6]. Используем допущение о том, что аксиальный ток  $i_k(t)$  КЗ практически равномерно распределен по поперечному сечению  $S_i$  жилы (оболочки) провода (кабеля) рассматриваемого электрооборудования. Обоснованием такому допущению является то, что минимальная глубина проникновения  $\Delta_i$  магнитного поля (толщина скин-слоя) от тока  $i_k(t)$  КЗ в квазистационарном приближении в рассматриваемые проводниковые немагнитные материалы, определяемая из расчетного соотношения вида  $\Delta_i \approx [1/(\pi f \mu_0 \gamma_{0i})]^{1/2}$  [2], где  $\gamma_{0i}$  – удельная электропроводность материала жилы (оболочки) КПП при  $\theta_0=20$  °С, а  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная, численно составляет для меди примерно 9,3 мм, а для алюминия – 11,8 мм. Видно, что приведенные численные значения величины  $\Delta_i$  оказываются соизмеримыми с реальными радиусами (толщинами) токонесущих жил (оболочек) проводов и кабелей, используемых в цепях электрооборудования общепромышленного назначения. Используем условие адиабатического характера протекающих при временах действия тока  $i_k(t)$  КЗ в силовых цепях указанного электрооборудования не более 1000 мс в материалах жил (оболочек) исследуемой КПП электротермических процессов, при котором влиянием теплоотдачи с поверхностей токонесущих частей, имеющих текущую температуру  $\theta_{Ci} \geq \theta_{0i}$ , и теплопроводности слоев ее электропроводящих материалов жилы (оболочки) и изоляции на джоулев нагрев токонесущих частей КПП пренебрегаем. Требуется расчетным путем в приближенном виде определить критические сечения  $S_{Ci}$  токонесущих частей для неизолированных медных (алюминиевых) проводов, а также для изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, используемых в силовых цепях электрооборудования обще-

промышленного применения и испытывающих в аварийном режиме работы прямое воздействие аксиального тока  $i_k(t)$  КЗ с заданными АВП. Кроме того, на основании расчета величин критических сечений  $S_{Ci}$  необходимо определить величины критических амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  переменного тока частотой  $f=50$  Гц в токонесущих частях проводов и кабелей силовых цепей электрооборудования промышленной электроэнергетики, по которым может протекать ток  $i_k(t)$  КЗ.

**2. Электротехнический подход к расчетному выбору критических сечений  $S_{Ci}$  и плотностей  $\delta_{Ci}$  тока в проводах и кабелях цепей электрооборудования общепромышленного назначения.** Для нахождения критических поперечных сечений  $S_{Ci}$  токопроводящих жил (оболочек) рассматриваемых не- и изолированных с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией электрических проводов и кабелей в силовых цепях электрооборудования с аксиальным током  $i_k(t)$  КЗ заданных АВП из уравнения их теплового баланса в адиабатическом режиме джоулева нагрева токонесущих частей КПП следует следующее расчетное соотношение [3]:

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

где  $J_{CiA} = \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt$  – интеграл Джоуля (действия) для

тока  $i_k(t)$  КЗ с длительностью  $t_k$  его протекания по жилам (оболочкам) КПП,  $A^2 \cdot c$ ;  $D_{Ci} = (J_{Ci} - J_{li})^{1/2}$ ,  $A \cdot c^{1/2} / m^2$ ;  $J_{Ci}$  – критическое значение интеграла тока для материала жил (оболочек) проводов и кабелей цепей электрооборудования [2],  $A^2 \cdot c / m^4$ ;  $J_{li}$  – значение интеграла тока для материала жил (оболочек) проводов и кабелей цепей электрооборудования, длительно допустимая температура нагрева которого номинальным током соответствует известной величине  $\theta_{li}$  [4],  $A^2 \cdot c / m^4$ .

В (1) величину интеграла тока  $J_{li}$  рассчитываем по следующему аналитическому выражению [3]:

$$J_{li} = \gamma_{0i} \beta_{0i}^{-1} \ln [c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{li} - \theta_0) + 1], \quad (2)$$

где  $c_{0i}$ ,  $\beta_{0i}$  – соответственно удельная теплоемкость, отнесенная к единице объема материала жилы (оболочки) провода (кабеля) и тепловой коэффициент удельной электропроводности данного материала КПП до протекания по нему тока  $i_k(t)$  КЗ при  $\theta_0=20$  °С.

Из (2) видно, что при  $\theta_{li}=\theta_0$  (режим обесточивания КПП) искомый интеграл тока обнуляется ( $J_{li}=0$ ).

В табл. 1 при  $\theta_0=20$  °С приведены численные значения для таких основных характеристик медных и алюминиевых жил (оболочек) проводов (кабелей) исследуемых силовых цепей как  $\gamma_{0i}$ ,  $c_{0i}$ ,  $\beta_{0i}$  и  $J_{Ci}$  [2].

Таблица 1

Теплофизические характеристики медных (алюминиевых) жил (оболочек) рассматриваемых проводов и кабелей силовых цепей электрооборудования до воздействия на них тока  $i_k(t)$  КЗ (при  $\theta_0=20$  °С) [2]

Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Численное значение характеристики			
	$\gamma_{0i}, 10^7$ (Ом·м) <sup>-1</sup>	$c_{0i}, 10^6$ Дж/ (м <sup>3</sup> ·°С)	$\beta_{0i}, 10^{-9}$ м <sup>3</sup> /Дж	$J_{Ci}, 10^{17}$ А <sup>2</sup> ·с·м <sup>-4</sup>
Медь	5,81	3,92	1,31	1,95
Алюминий	3,61	2,70	2,14	1,09

В табл. 2 с учетом использования данных (1), (2) и табл. 1 приведены численные значения коэффициента  $D_{Ci}$ , необходимого для расчетного определения согласно (1) величины критического сечения  $S_{Ci}$  токопроводящей жилы (оболочки) рассматриваемого провода (кабеля) в силовой цепи электрооборудования, применяемого в промышленной электроэнергетике.

Таблица 2

Численные значения коэффициента  $D_{Ci}$  для не- и изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в цепях электрооборудования общепромышленного назначения

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электроустановки	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Численное значение $D_{Ci}$ , $10^8 \text{ A} \cdot \text{c}^{1/2} / \text{M}^2$	
		$J_{li} \neq 0$	$J_{li} = 0$
Без изоляции	Медь	4,299	4,415
	Алюминий	3,236	3,301
ПВХ, Р	Медь	4,299	4,415
	Алюминий	3,236	3,301
ПЭТ	Медь	4,299	4,415
	Алюминий	3,236	3,301

Из данных табл. 2 видно, что токовый режим работы рассматриваемой КПП (провода и кабели цепей электрооборудования полностью загружены номинальным током ( $J_{li} \neq 0$ ) или при  $J_{li} = 0$  полностью обесточены) незначительно влияет на численные значения расчетного коэффициента  $D_{Ci}$  (до 3 %). Его количественные значения определяются главным образом видом токопроводящего материала жилы (оболочки) исследуемой КПП. Для меди и алюминия отличие в численных значениях  $D_{Ci}$  составляет примерно 25 %.

Из (1) следует, что при найденных численных значениях коэффициента  $D_{Ci}$  (см. табл. 2) определение критических сечений  $S_{Ci}$  медных (алюминиевых) жил (оболочек) исследуемой КПП сводится к количественному нахождению интеграла действия  $J_{CiA}$  тока  $i_k(t)$  КЗ, протекающего в течение времени  $t_k$  по токонесущим частям выбранных проводов и кабелей.

**2.1. Приближенный расчет при КЗ интеграла действия  $J_{CiA}$  аварийного тока.** Как и в [7, 8] принимаем, что ток  $i_k(t)$  КЗ в цепях с рассматриваемой КПП описывается следующей временной зависимостью:

$$i_k(t) = I_{mk} [\exp(-t/T_a) - \cos(2\pi t/T_p)], \quad (3)$$

где  $I_{mk}$  – амплитуда установившегося в силовой цепи электрооборудования тока  $i_k(t)$  КЗ;  $T_a$ ,  $T_p$  – соответственно постоянная времени спада аperiodической составляющей и период колебаний периодической составляющей аварийного тока  $i_k(t)$  КЗ в цепи с КПП.

Тогда, исходя из (1) и (3), расчетное выражение для интеграла действия тока  $i_k(t)$  КЗ в силовых цепях с КПП принимает следующий аналитический вид [7]:

$$J_{CiA} = I_{mk}^2 \left\{ 0,5t_k + 0,25\pi^{-1}T_p \sin(2\pi t_k/T_p) \times \right. \\ \times \cos(2\pi t_k/T_p) - 2T_a^2 T_p^2 (T_p^2 + 4\pi^2 T_a^2)^{-1} [\exp(-t_k/T_a) \times \\ \times [2\pi T_p^{-1} \sin(2\pi t_k/T_p) - T_a^{-1} \cos(2\pi t_k/T_p) + T_a^{-1}] + \\ \left. + 0,5T_a [1 - \exp(-2t_k/T_a)] \right\}. \quad (4)$$

В табл. 3 для случая  $T_a = 50$  мс ( $T_p = 20$  мс) приведены рассчитанные по (4) численные значения инте-

грала действия  $J_{CiA}$  для тока  $i_k(t)$  КЗ при характерных согласно требований [4, 8] амплитудах  $I_{mk}$  установившегося тока КЗ и длительностях протекания (временах отключения)  $t_k$  его в силовых цепях электрооборудования общепромышленного применения. Зная численные значения коэффициента  $D_{Ci}$  (см. табл. 2) и интеграла действия  $J_{CiA}$  тока  $i_k(t)$  КЗ (см. табл. 3), по (1) могут быть сравнительно легко определены численные значения критических сечений  $S_{Ci}$  токонесущих частей рассматриваемой КПП в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения. С учетом принятых допущений из соотношения вида  $\delta_{Ci} \approx I_{mk}/S_{Ci}$  могут быть количественным образом оценены и критические амплитуды плотностей  $\delta_{Ci}$  переменного тока в материалах жил (оболочек) исследуемых проводов (кабелей) для аварийного режима КЗ.

Таблица 3

Численные значения интеграла действия  $J_{CiA}$  для тока  $i_k(t)$  КЗ, протекающего в силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения ( $T_p = 20$  мс;  $T_a = 50$  мс), рассчитанные по соотношению (4)

Значение амплитуды $I_{mk}$ установившегося тока $i_k(t)$ КЗ в силовой цепи промышленной электроустановки, кА	Значение интеграла действия $J_{CiA}$ для тока $i_k(t)$ КЗ по (4), $10^7 \cdot \text{A}^2 \cdot \text{c}$	
	$t_k = 100$ мс	$t_k = 160$ мс
30	6,75	9,45
50	18,75	26,25
70	36,75	51,45
100	75,00	105,00
125	117,18	164,06

**2.2. Результаты расчетного выбора критических сечений  $S_{Ci}$  и плотностей  $\delta_{Ci}$  тока в проводах и кабелях цепей электрооборудования общепромышленного назначения.** В табл. 4 приведены результаты приближенного расчета по (1) с учетом данных табл. 2 и 3 критических поперечных сечений  $S_{Ci}$  медных (алюминиевых) жил (оболочек) неизолированных (оголенных) проводов и изолированных проводов (кабелей) силовых цепей электрооборудования общепромышленного назначения ( $T_p = 20$  мс) для случая, когда  $J_{li} \neq 0$ ,  $t_k = 100$  мс и  $T_a = 50$  мс, а амплитуда  $I_{mk}$  установившегося тока  $i_k(t)$  КЗ изменяется дискретно в диапазоне (30-100) кА. Из данных табл. 4 следует, что критические амплитуды плотностей  $\delta_{Ci} \approx I_{mk}/S_{Ci}$  тока  $i_k(t)$  КЗ при времени его протекания (отключения) в силовых цепях электроустановок, равно  $t_k = 100$  мс, для неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в цепях электрооборудования общепромышленного назначения ( $T_p = 20$  мс;  $T_a = 50$  мс) численно составляют примерно 1,57 кА/мм<sup>2</sup> и 1,18 кА/мм<sup>2</sup> соответственно. Важно отметить то, что эти значения критических амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  тока  $i_k(t)$  КЗ в материалах токонесущих частей рассматриваемых проводов (кабелей) силовых цепей электрооборудования не зависят от уровня в них амплитуды  $I_{mk}$  установившегося аварийного тока КЗ промышленной частоты 50 Гц.

В табл. 5 представлены результаты расчетного определения по (1) с учетом данных табл. 2 и 3 кри-

тических поперечных сечений  $S_{Ci}$  медных (алюминиевых) жил (оболочек) неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) силовых цепей электрооборудования общепромышленного применения ( $T_p=20$  мс) для случая, когда  $J_{ii} \neq 0$ ,  $t_k=160$  мс и  $T_a=50$  мс, а амплитуда  $I_{mk}$  установившегося тока  $i_k(t)$  КЗ изменяется дискретно в диапазоне (30-100) кА.

Таблица 4

Численные значения критических поперечных сечений  $S_{Ci}$  для неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (оболочками) в силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения при амплитуде  $I_{mk}$  тока  $i_k(t)$  КЗ, изменяющейся в диапазоне от 30 до 100 кА (для  $t_k=100$  мс и  $T_a=50$  мс)

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электроустановки	Материал жилы (оболочка) провода (кабеля)	Значение сечения $S_{Ci}$ , мм <sup>2</sup>			
		Амплитуда $I_{mk}$ установившегося тока КЗ, кА			
		30	50	70	100
Без изоляции	Медь	19,11	31,85	44,59	63,70
	Алюминий	25,38	42,31	59,24	84,63
ПВХ, Р	Медь	19,11	31,85	44,59	63,70
	Алюминий	25,38	42,31	59,24	84,63
ПЭТ	Медь	19,11	31,85	44,59	63,70
	Алюминий	25,38	42,31	59,24	84,63

Таблица 5

Численные значения критических поперечных сечений  $S_{Ci}$  для неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (оболочками) в силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения при амплитуде  $I_{mk}$  тока  $i_k(t)$  КЗ, изменяющейся в диапазоне от 30 до 100 кА (для  $t_k=160$  мс и  $T_a=50$  мс)

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электроустановки	Материал жилы (оболочка) провода (кабеля)	Значение сечения $S_{Ci}$ , мм <sup>2</sup>			
		Амплитуда $I_{mk}$ установившегося тока КЗ, кА			
		30	50	70	100
Без изоляции	Медь	22,61	37,68	52,76	75,37
	Алюминий	30,04	50,06	70,09	100,13
ПВХ, Р	Медь	22,61	37,68	52,76	75,37
	Алюминий	30,04	50,06	70,09	100,13
ПЭТ	Медь	22,61	37,68	52,76	75,37
	Алюминий	30,04	50,06	70,09	100,13

Из данных табл. 5 следует, что критические амплитуды плотностей  $\delta_{Ci} \approx I_{mk}/S_{Ci}$  тока  $i_k(t)$  КЗ при времени  $t_k=160$  мс его протекания (отключения) в силовых цепях рассматриваемого электрооборудования для неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в цепях электрооборудования общепромышленного назначения ( $T_p=20$  мс;  $T_a=50$  мс) численно составляют примерно  $1,33$  кА/мм<sup>2</sup> и  $0,99$  кА/мм<sup>2</sup> соответственно. Причем, указанные для расчетного случая ( $t_k=160$  мс;  $T_a=50$  мс) численные значения критических амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  тока  $i_k(t)$  КЗ в медных (алюминиевых) жилах (оболочках) рассматриваемой КПП силовых цепей электрооборудования промышленной электроэнергетики, как и для предыдущего случая ( $t_k=100$  мс;

$T_a=50$  мс), не зависят от количественных значений амплитуды  $I_{mk}$  установившегося тока КЗ. Кроме того, из данных табл. 4 и 5 вытекает, что количественные значения величин критических сечений  $S_{Ci}$  и критических амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  переменного тока  $i_k(t)$  КЗ для токонесущих частей исследуемой КПП, широко используемой в силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения, не зависят от того или иного вида изоляции (воздушной или твердой), применяемой в рассматриваемых электрических проводах и кабелях электроэнергетических устройств.

#### Выводы.

1. Предложенный электротехнический подход позволяет по условию ЭВ в атмосферном воздухе токонесущих частей КПП осуществлять приближенный расчет критических поперечных сечений  $S_{Ci}$  и амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  переменного аксиального тока для неизолированных проводов с медными (алюминиевыми) жилами, а также для изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, по которым в аварийных режимах работы силового электрооборудования общепромышленного назначения протекает переменный ток  $i_k(t)$  КЗ с заданными АВП.

2. Используемые приближенные расчетные соотношения (1)-(4) позволили для двух реальных случаев ( $t_k=100$  мс;  $t_k=160$  мс) при  $T_a=50$  мс установить для дискретного изменения амплитуды  $I_{mk}$  установившегося тока  $i_k(t)$  КЗ в диапазоне (30-100) кА конкретные возможности предложенного электротехнического подхода по выбору критических сечений  $S_{Ci}$  и амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  переменного тока в указанных проводах и кабелях силовых цепей электрооборудования общепромышленного назначения, по токонесущим частям которых в аварийных режимах работы рассматриваемого силового электрооборудования протекают большие аксиальные токи  $i_k(t)$  КЗ.

3. Расчетным путем установлено, что критические амплитуды плотностей  $\delta_{Ci} \approx I_{mk}/S_{Ci}$  аксиального тока  $i_k(t)$  КЗ в медных (алюминиевых) жилах неизолированных проводов и изолированных проводах (кабелях) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией при  $T_a=50$  мс для случая времени отключения  $t_k=100$  мс тока  $i_k(t)$  КЗ в силовых цепях электрооборудования численно составляют соответственно примерно  $1,57$  ( $1,18$ ) кА/мм<sup>2</sup>, а для случая  $t_k=160$  мс –  $1,33$  ( $0,99$ ) кА/мм<sup>2</sup>.

4. Полученные результаты для критических поперечных сечений  $S_{Ci}$  и амплитуд плотностей  $\delta_{Ci}$  переменного аксиального тока частотой  $f=50$  Гц ( $T_p=20$  мс) могут быть использованы в электроэнергетической практике при выборе термически стойкой к действию больших аксиальных токов  $i_k(t)$  КЗ КПП с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), предназначенной для работы в силовых цепях электрооборудования промышленной электроэнергетики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Расчетно-экспериментальное определение критических сечений электрических проводов и кабелей в цепях устройств высоковольтной сильноточной импульсной

- техники // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2019. – №2. – С. 39-46. doi: 10.20998/2074-272X.2019.2.06.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
  3. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.
  4. *Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, Кн. 1 / Под общей ред. И.Н. Орлова и др.* – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
  5. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
  6. Баранов М.И. Выбор сечений электрических проводов и кабелей в цепях устройств высоковольтной силовоточной импульсной техники // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2018. – №6. – С. 56-62. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.08.
  7. Баранов М.И. Уточненный выбор допустимых сечений электрических проводов и кабелей в силовых цепях промышленного электрооборудования с учетом аварийных режимов работы // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2019. – №3. – С. 37-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.06.
  8. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Высшая школа, 1972. – 432 с.

#### REFERENCES

1. Baranov M.I. Calculation and experimental determination of critical sections of electric wires and cables in the circuits of devices of high-voltage high-current pulse technique. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.2, pp. 39-46. doi: 10.20998/2074-272X.2019.2.06.
2. Knopfel' G. *Sverkhstil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
3. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Monografiya v 3kh tomakh. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Monograph in 3 Vols. Vol. 3. Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
4. Orlov I.N. *Elektrotehnicheskij spravochnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoy energii. Tom 3, Kn. 1* [Electrical engineering handbook. Production and distribution of electric energy. Vol. 3, Book 1. Ed. I.N. Orlov]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 880 p. (Rus).
5. 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).
6. Baranov M.I. A choice of sections of electric wires and cables in circuits of devices of high-voltage high-current impulse technique. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.6, pp. 56-62. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.08.
7. Baranov M.I. Refined selection of allowable cross-sections of electrical conductors and cables in the power circuits of industrial electrical equipment taking into account emergency operating modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.3, pp. 37-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.06.
8. Knyazevskiy B.A., Lipkin B.Yu. *Elekrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatij* [Power supply of industrial enterprises]. Moscow, High School Publ., 1972. 432 p. (Rus).

Поступила (received) 04.02.2019

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 critical sections of electric wires and cables in power circuits of electrical equipment of power industry.

**Purpose.** Implementation of close calculation determination of critical sections of  $S_{Ci}$  and critical amplitudes of density of alternating current  $\delta_{Ci}$  of frequency 50 Hz in wires and cables of power circuits of electrical equipment of power industry, characterized flowing in it at malfunctions of operation current  $i_k(t)$  of short circuit (SC) with set amplitude-temporal parameters (ATP). **Methodology.** Scientific and technical bases of power engineering, electrophysics bases of technique of high-voltage and large pulsed currents, theoretical bases of the electrical engineering. **Results.** The results of the developed electrical engineering approach are resulted in a calculation choice on the condition of electric explosion (EE) of current-carrying parts of cable and conductor products (CCP) of critical sections of  $S_{Ci}$  for the copper (aluminum) cores of the uninsulated wires, and also for the insulated wires and cables with a polyvinylchloride (PVC), rubber (R) and polyethylene (PET) insulation with copper (aluminum) cores (shells) on which in the power circuits of electrical equipment of the general industrial equipment in malfunction the current of SC  $i_k(t)$  flows with set ATP. On the basis of determination of sizes of the real critical sections  $S_{Ci}$  for the indicated wires and cables the calculation numeral estimation of critical amplitudes of density  $\delta_{Ci}$  of SC current  $i_k(t)$  is executed with set ATP in current-carrying parts of investigated CCP of power circuits of the examined electrical equipment. It is determined that in the power circuits of electric equipment of the general industrial installations (for permanent time of slump of  $T_a=50$  ms of aperiodic to the constituent of current of SC) critical amplitudes of density  $\delta_{Ci}$  of SC current  $i_k(t)$  at time of his disconnecting  $t_k=100$  ms in copper (aluminum) cores for the uninsulated wires and insulated wires (cables) with copper (aluminum) cores (shells), PVH, R and PET it is numeral made an insulation according to approximately 1,57 (1,18) kA/mm<sup>2</sup>. At time of disconnecting  $t_k=160$  ms of SC current  $i_k(t)$  in the power circuits of the examined electrical equipment ( $T_a=50$  ms) critical amplitudes of density  $\delta_{Ci}$  of SC current  $i_k(t)$  for the copper (aluminum) cores (shells) of indicated CCP become accordingly numeral equal approximately 1,33 (0,99) kA/mm<sup>2</sup>. **Originality.** First by a calculation way taking into account information for ATP of SC current  $i_k(t)$  and quantitative values of time of his disconnecting  $t_k$  in the power circuits of electrical equipment of the general industrial installations the numerical values of critical sections  $S_{Ci}$  and critical amplitudes of density  $\delta_{Ci}$  of AC SC current  $i_k(t)$  are certain for the uninsulated wires, and also insulated wires and cables with copper (aluminum) cores (shells), PVH, R and PET insulation. **Practical value.** Obtained results for the critical sections  $S_{Ci}$  and amplitudes of density  $\delta_{Ci}$  of AC SC current  $i_k(t)$  of frequency 50 Hz (at the period of oscillations of  $T_p=20$  ms for of periodic constituent of emergency current of SC) can be utilized in power industry in practice at a choice thermally by a bar to the action of large SC currents  $i_k(t)$  of CCP with copper (aluminum) bars (shells), intended for reliable operation in the power circuits of electrical equipment of industrial power industry. References 8, tables 5.

**Key words:** power industrial, electrical equipment, electric wires and cables of circuits of electrical equipment, calculation choice of critical sections of wires and cables in the circuits of electrical equipment.