

М.И. Баранов

УТОЧНЕННЫЙ ВЫБОР ДОПУСТИМЫХ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Надані результати розробленого інженерного електротехнічного підходу до уточненого розрахункового вибору гранично допустимих перерізів S_{ij} електричних неізолюваних дротів, ізолюваних дротів і кабелів з полівінілхлоридною (ПВХ), гумовою (Г) і поліетиленовою (ПЕТ) ізоляцією і мідними (алюмінієвими) жилами (оболонками) по умові їх термічної стійкості, по яких в силових колах електроустановок загальнопромислового призначення в аварійному режимі протікає струм $i_k(t)$ короткого замикання (КЗ) із заданими параметрами. На підставі цього підходу здійснений уточнений вибір перерізів S_{ij} для вказаних дротів (кабелів) силових кіл досліджуваного електрообладнання. Виконана розрахункова оцінка гранично допустимих амплітуд щільності δ_{lim} струму $i_k(t)$ КЗ в даних дротах і кабелях силових кіл вказаних електроустановок. Отримані результати сприятимуть підвищенню термічної стійкості електричних неізолюваних дротів, ізолюваних дротів і кабелів з ПВХ, Г і ПЕТ ізоляцією і мідними (алюмінієвими) жилами (оболонками), які широко застосовуються в силових колах електроустановок загальнопромислового призначення. Бібл. 6, табл. 6. Ключові слова: електроенергетика, електричні дроти і кабелі кіл електроустановок загальнопромислового призначення, розрахунковий вибір гранично допустимих перерізів дротів і кабелів в колах електрообладнання.

Приведены результаты разработанного инженерного электротехнического подхода к уточненному расчетному выбору предельно допустимых сечений S_{ij} электрических неизолированных проводов, изолированных проводов и кабелей с поливинилхлоридной (ПВХ), резиновой (Р) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией и медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) по условию их термической стойкости, по которым в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения в аварийном режиме протекает ток $i_k(t)$ короткого замыкания (КЗ) с заданными параметрами. На основании этого подхода осуществлен уточненный выбор сечений S_{ij} для указанных проводов (кабелей) силовых цепей исследуемого электрооборудования. Выполнена расчетная оценка предельно допустимых амплитуд плотностей δ_{lim} тока $i_k(t)$ КЗ в рассматриваемых проводах и кабелях силовых цепей указанных электроустановок. Полученные результаты будут способствовать повышению термической стойкости электрических неизолированных проводов, изолированных проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией и медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), широко применяемых в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения. Библ. 6, табл. 6.

Ключевые слова: электроэнергетика, электрические провода и кабели цепей электроустановок общепромышленного назначения, расчетный выбор предельно допустимых сечений проводов и кабелей в цепях электрооборудования.

Введение. Вопросам обоснованного выбора поперечных сечений электрических проводов и кабелей, используемых в электрооборудовании (электроустановках) промышленной электроэнергетики, уделялось и уделяется повышенное внимание [1]. Особо остро эти вопросы возникают при аварийных режимах работы ее электрооборудования, обусловленных всеми видами короткого замыкания (КЗ) в электрических сетях (ЭС). Не менее опасными для надежного функционирования электрооборудования, запитываемого от сетей промышленного электроснабжения, являются режимы его работы, связанные с токовыми перегрузками входящей в его состав широкой номенклатуры кабельно-проводниковой продукции (КПП). Большинство возгораний КПП цепей электрооборудования промышленной электроэнергетики (при температурах токонесущих жил проводов и кабелей порядка 450 °С [1]), приводящих к длительному обесточиванию потребителей электрической энергии, а также к большому материальному ущербу и гибели людей, как раз и связаны с подобными режимами их работы. Из возможных аварийных режимов работы ЭС (КЗ различных видов, возгорание КПП и другие виды ее повреждений) расчетным для выбора их электрооборудования, включая и такие его комплектующие элементы как электрические аппараты, и соответственно его КПП является режим КЗ [2,3]. В [1] был представлен известный электротехнический подход по приближенному выбору в области промышленной

электроэнергетики минимально допустимых сечений S_{imin} различных марок электрических проводов и кабелей для кратковременных режимов их работы из условия их термической стойкости к действию тока КЗ. «Узким местом» в этом инженерном подходе является расчетное нахождение интеграла Джоуля B_k для тока КЗ (интеграла действия тока КЗ), определяющее точность вычисления значений указанных сечений S_{imin} . Приведенные в [1] графические материалы (например, рис. 36.38) для трех видов материалов жил проводов и кабелей (меди, алюминия и стали), используемые при определении конечной температуры θ_k джоулевого нагрева током КЗ токонесущих частей КПП, не в полной мере описывают особенности процесса приближенного расчета численных значений указанного интеграла B_k и допустимых сечений S_{imin} (например, выбора для этих целей амплитудно-временных параметров (АВП) периодической и апериодических составляющих тока КЗ, длительности t_{kc} процесса КЗ и др.). Кроме того, отсутствие в [1] аналитического соотношения для приближенного определения температуры θ_k джоулевого нагрева током КЗ токонесущих частей КПП затрудняет осуществление для проводов и кабелей проверки выполнения условия их термической стойкости к действию тока КЗ.

Поэтому в области промышленной электроэнергетики при выборе значений минимально допустимых сечений S_{imin} для КПП силовых цепей электрообору-

© М.И. Баранов

дования возникает необходимость в более развернутом и уточняющем расчетном определении предельно допустимых поперечных сечений S_{il} электрических проводов и кабелей, содержащих металлические жилы ($i=1$) и обратные токопроводы-оболочки ($i=2$), а также ту или иную поясную и защитную изоляцию.

Целью статьи является выполнение уточняющего существующий инженерный подход к определению в промышленной электроэнергетике минимально допустимых поперечных сечений S_{imin} КПП расчетного выбора предельно допустимых сечений S_{il} электрических проводов и кабелей в силовых цепях промышленного электрооборудования с учетом протекания в аварийном режиме тока $i_k(t)$ трехфазного КЗ.

1. Постановка задачи. Рассмотрим широко используемые в силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения неизолированные медные и алюминиевые провода, а также изолированные провода и кабели с медными (алюминиевыми) внутренними жилами и наружными оболочками, имеющие поливинилхлоридную (ПВХ), резиновую (Р) или полиэтиленовую (ПЭТ) изоляцию [1, 4]. Принимаем, что по круглым сплошным или расщепленным медным (алюминиевым) жилам и оболочкам указанных проводов и кабелей силовых цепей электроустановок, находящихся на атмосферном воздухе с температурой $\theta_0=20$ °С в нормальном режиме их работы под номинальной токовой нагрузкой, в их продольном направлении протекает переменный ток частотой $f=50$ Гц, а максимальная длительно допустимая температура θ_{ll} джоулевого нагрева для не- и изолированных проводов и кабелей с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией численно не превышает регламентируемых действующими требованиями уровней в 70 °С и 65 °С соответственно [1]. Для общности решаемой задачи условимся, что в исследуемых силовых цепях с КПП возможны режимы их работы, когда их токонесущие части полностью обесточены. Как и в [1] считаем, что термическая стойкость рассматриваемых электрических проводов и кабелей лимитируется предельно допустимой кратковременной температурой θ_{IS} нагрева токонесущих частей проводов (кабелей) при трехфазном виде КЗ в ЭС электроснабжения исследуемой электроустановки. Полагаем, что значения θ_{IS} соответствуют известным предельно допустимым кратковременным температурам нагрева КПП переменными токами КЗ промышленной частоты [1]. В этой связи численные значения температуры θ_{IS} для неизолированных медных проводов при тяжениях менее 20 Н/мм² будут составлять 250 °С, а для неизолированных алюминиевых проводов при тяжениях менее 10 Н/мм² – 200 °С [1]. Для изолированных проводов и кабелей с медными и алюминиевыми жилами, ПВХ и Р изоляцией численные значения температуры θ_{IS} оказываются равными 150 °С, а для указанной КПП с ПЭТ изоляцией – 120 °С [1]. При выборе сечений S_{il} принимаем, что ток $i_k(t)$ КЗ практически равномерно распределяется по поперечному сечению жилы и оболочки провода (кабеля). Одним из обоснований тако-

го допущения является то, что минимальная глубина проникновения Δ_i магнитного поля (толщина скин-слоя) от тока $i_k(t)$ КЗ в квазистационарном приближении в рассматриваемые проводниковые ферромагнитные материалы, определяемая из расчетного соотношения вида $\Delta_i \approx [1/(\pi f \mu_0 \gamma_{0i})]^{1/2}$ [5], где γ_{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 эти значения Δ_i оказываются соизмеримыми с реальными радиусами (толщинами) токонесущих жил (оболочек) проводов и кабелей, обычно используемыми в цепях электроустановок общепромышленного назначения. Воспользуемся условием адиабатического характера протекающих при временах действия тока $i_k(t)$ КЗ не более 1000 мс в материалах жил (оболочек) рассматриваемой КПП термических процессов, при котором влиянием теплоотдачи с поверхностей их токонесущих частей, имеющих текущую температуру $\theta_{is} \geq \theta_0$, и теплопроводности слоев их проводящих материалов и изоляции на джоулев нагрев токонесущих частей жил (оболочек) проводов (кабелей) пренебрегаем. Требуется расчетным путем в приближенном виде с учетом нелинейного характера изменения из-за джоулева нагрева указанной КПП величины удельной электропроводности γ_i материала ее жил (оболочек) и условия термической стойкости КПП к действию тока КЗ в развернутом виде определить предельно допустимые поперечные сечения S_{il} токонесущих частей для неизолированных медных (алюминиевых) проводов, а также для изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р или ПЭТ изоляцией, широко используемых в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения и по которым в аварийном режиме работы ЭС протекает трехфазный ток $i_k(t)$ КЗ промышленной частоты $f=50$ Гц с теми или иными заданными АВП.

2. Предлагаемый уточненный подход к выбору предельно допустимых сечений S_{il} проводов и кабелей в цепях электроустановок общепромышленного назначения. Из уравнения теплового баланса для токонесущих частей КПП цепей указанных электроустановок в адиабатическом режиме и условия их термической стойкости к току $i_k(t)$ принятого КЗ аналитическое выражение для уточненного расчетного определения предельно допустимых поперечных сечений S_{il} рассматриваемых электрических проводов и кабелей приобретает следующий вид [6]:

$$S_{il} = [J_{ak} / (J_{iIS} - J_{iII})]^{1/2} = J_{ak}^{1/2} / C_{ik}, \quad (1)$$

где $J_{ak} = B_k = \int_0^{t_{kC}} i_k^2(t) dt$ – интеграл Джоуля (действия) тока $i_k(t)$ КЗ, А²·с; J_{iIS} , J_{iII} – интегралы тока для токонесущих частей проводов (кабелей), предельно допустимая кратковременная температура и длительно допустимая температура нагрева материала которых равны θ_{IS} и θ_{ll} соответственно, А²·с·м⁻⁴; $C_{ik} = (J_{iIS} - J_{iII})^{1/2}$ – коэффициент, численные значения которого будут указаны ниже и сопоставлены с известными, А·с^{1/2}·м⁻².

2.1. Расчет интегралов тока J_{iIS} , J_{iII} и коэффициента C_{ik} . Для расчетного определения с инженерной точностью величин входящих в (1) интегралов тока J_{iIS} и J_{iII} , применяемых в [5] в виде интегралов тока или инерции (см. формулу 4.56), подынтегральная функция которых в отличие от классического интеграла Джоуля содержит не квадрат тока $i_k(t)$, а квадрат плотности указанного тока $\delta_i(t)$ в электропроводящих материалах КПП, используем следующие приближенные аналитические выражения [6]:

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

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

где c_{0i} , β_{0i} – соответственно удельная объемная теплоемкость и тепловой коэффициент удельной электропроводности проводящего материала жилы (оболочки) провода (кабеля) рассматриваемой силовой цепи электроустановки до воздействия на исследуемую КПП аварийного тока $i_k(t)$ КЗ с произвольными АВП, количественно определяемые при $\theta_0=20$ °С.

Ниже в табл. 1 приведены численные значения используемых величин γ_{0i} , c_{0i} и β_{0i} для основных проводниковых материалов токонесущих частей КПП при температуре среды, равной $\theta_0=20$ °С [5, 6].

Таблица 1

Значения характеристик основных материалов токонесущих жил (оболочек) не- и изолированных проводов и кабелей силовых цепей электроустановок общепромышленного назначения при $\theta_0=20$ °С [5, 6]

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

Зная значения указанных характеристик γ_{0i} , c_{0i} и β_{0i} (см. табл. 1), при заданных величинах нормированных температур θ_0 , θ_{IS} и θ_{II} с помощью (2) и (3) могут быть сравнительно легко найдены численные значения интегралов тока J_{iIS} , J_{iII} и коэффициента C_{ik} , используемого в (1), для широкой номенклатуры КПП, применяемой в силовых цепях рассматриваемых электроустановок. В табл. 2 указаны численные значения искомого коэффициента C_{ik} для основных исполнений КПП, применяемой в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения.

Таблица 2

Уточненные значения коэффициента C_{ik} для не- и изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электроустановки	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Численное значение C_{ik} , $10^8 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{М}^2$	
		$J_{iII} \neq 0$	$J_{iII} = 0$
Без изоляции	Медь	1,56	1,86
	Алюминий	0,88	1,09
ПВХ, Р	Медь	1,16	1,51
	Алюминий	0,74	0,97
ПЭТ	Медь	0,96	1,36
	Алюминий	0,62	0,88

Заметим, что в табл. 2 случай, когда $J_{iII} \neq 0$, соответствует номинальной токовой нагрузке КПП в цепях исследуемых электроустановок (температура их токонесущих частей равна θ_{II}), а случай при $J_{iII} = 0$ – режиму обесточивания КПП (температура их токонесущих частей до протекания по ним тока КЗ $i_k(t)$ равна температуре окружающей воздушной среды $\theta_0=20$ °С). Для сравнения полученных уточненных данных для коэффициента C_{ik} (см. табл. 2) ниже в табл. 3 приведены известные согласно [1] его численные значения, соответствующие режиму работы КПП, когда $J_{iII} \neq 0$.

Таблица 3

Известные значения коэффициента C_{ik} для основных видов электрических проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами в промышленных электроэнергетических цепях при действии на них тока КЗ [1]

№	Наименование провода (кабеля) и шины	$C_{k1/2}$, $10^8 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{М}^2$
1	Провода (шины) медные неизолированные	1,70
2	Провода (шины) алюминиевые неизолированные	0,90
3	Кабели (изолированные провода) с ПВХ и Р изоляцией и медными жилами	1,20
4	Кабели (изолированные провода) с ПВХ и Р изоляцией и алюминиевыми жилами	0,75
5	Кабели (изолированные провода) с ПЭТ изоляцией и медными жилами	1,03
6	Кабели (изолированные провода) с ПЭТ изоляцией и алюминиевыми жилами	0,65

Из сравнения данных табл. 2 и 3 следует, что при $J_{iII} \neq 0$ их соответствующие численные значения для коэффициента C_{ik} в зависимости от вида КПП отличаются не более чем на (3-8) %, а для режима работы КПП в цепях электроустановок, когда $J_{iII} = 0$, эти отличия возрастают и достигают до (9-26) %. В этой связи выполненное наглядным образом на основе математических соотношений (2) и (3), учитывающих нелинейное изменение удельной электропроводности γ_i материала жил (оболочек) КПП при его джоулевым нагреве током $i_k(t)$ КЗ, расчетное уточнение численных значений для коэффициента C_{ik} , напрямую используемых для определения по (1) предельно допустимых поперечных сечений S_{iI} , является электротехнически оправданным и целесообразным действием.

2.2. Расчет при КЗ интеграла действия J_{ak} аварийного тока. Для этого первоначально запишем аналитическое соотношение, описывающее изменение во времени t тока $i_k(t)$ КЗ в силовых цепях электроустановок, используемых в промышленной электроэнергетике. Согласно [1, 3] АВП данного тока $i_k(t)$ КЗ подчиняются следующей временной зависимости:

$$i_k(t) = I_{mk} [\exp(-t/T_a) - \cos(2\pi t/T_p)], \quad (4)$$

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

Интересно отметить, что из (4) при $T_p=20$ мс и $t = 10$ мс, соответствующем наибольшей амплитуде ударного тока КЗ в цепях ЭС, вытекает известная расчетная формула для ударного коэффициента k_S , относящегося к характерным элементам и частям электро-

энергетической системы (ЭЭС) (например, для синхронных генераторов, электродвигателей и др.) [1]:

$$k_s = [1 + \exp(-0,01/T_a)]. \quad (5)$$

Отметим, что для турбогенераторов мощностью (100-1000) МВт численное значение величины T_a составляет примерно 500 мс (см. табл. 35.5 в [1]). В этой связи для подобных электроэнергетических элементов значение ударного коэффициента k_s при КЗ будет численно составлять около 1,98. Для распределительных кабельных сетей напряжением (6-10) кВ согласно данным указанной выше табл. 35.5 из [1] постоянная времени спада аperiodической составляющей тока КЗ принимает численное значение $T_a \approx 10$ мс. В последнем случае по (5) ударный коэффициент $k_s \approx 1,37$. Что касается известных максимальных уровней токов КЗ в сетях ЭЭС, то при номинальном напряжении сети в $U_n = 110$ кВ численное значение амплитуды тока отключения (фактически I_{mk}) составляет около 50 кА (см. табл. 36.7 в [1]). При $U_n = 10$ кВ в режиме КЗ амплитуда тока отключения в соответствии с данными табл. 36.7 из [1] может достигать уровня в 125 кА.

С учетом (1) и (4) расчетное выражение для искомого интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ КЗ в цепи рассматриваемой электроустановки в принятом приближении приобретает следующий аналитический вид:

$$J_{ak} = I_{mk}^2 \left\{ 0,5 t_{kC} + 0,25 \pi^{-1} T_p \sin(2\pi k_C / T_p) \times \right. \\ \times \cos(2\pi k_C / T_p) - 2 T_a^2 T_p^2 (T_p^2 + 4\pi^2 T_a^2)^{-1} \left[e^{-t_{kC}/T_a} \times \right. \\ \times [2\pi T_p^{-1} \sin(2\pi k_C / T_p) - T_a^{-1} \cos(2\pi k_C / T_p) + T_a^{-1}] \left. \right] + \\ \left. + 0,5 T_a (1 - e^{-2t_{kC}/T_a}) \right\} \quad (6)$$

Из (6) явно следует, что значение интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ КЗ прямо пропорционально квадрату амплитуды I_{mk} установившегося тока КЗ и длительности (времени отключения) t_{kC} КЗ. Чем больше численные значения I_{mk} и t_{kC} , тем будут большими и численные значения искомого величины J_{ak} . В табл. 4 при $T_a = 20$ мс ($T_p = 20$ мс) для четырех фиксированных численных значений амплитуды I_{mk} установившегося тока КЗ (30, 50, 70 и 100 кА) и двух заданных требованиями из [1] численных значений длительности t_{kC} КЗ (100 и 160 мс) приведены численные значения интеграла действия J_{ak} тока КЗ $i_k(t)$, рассчитанные по (6).

Таблица 4

Значения интеграла действия J_{ak} для тока $i_k(t)$ КЗ по (4), протекающего в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения (при $T_a = 20$ мс)

Значение амплитуды I_{mk} установившегося тока КЗ $i_k(t)$ в силовой цепи промышленной электроустановки, кА	Значение интеграла действия J_{ak} для тока КЗ $i_k(t)$ по (4), $A^2 \cdot c$	
	$t_{kC} = 100$ мс	$t_{kC} = 160$ мс
30	$5,4 \cdot 10^7$	$8,1 \cdot 10^7$
50	$15,0 \cdot 10^7$	$22,5 \cdot 10^7$
70	$29,4 \cdot 10^7$	$44,1 \cdot 10^7$
100	$60,0 \cdot 10^7$	$90,0 \cdot 10^7$

Определив по (6) численные значения интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ КЗ (см. табл. 4) и зная численные значения коэффициента C_{ik} (см. табл. 2), с учетом (1) могут быть найдены уточненные численные значения предельно допустимых сечений S_{il} токонесущих частей рассматриваемой КПП в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения. Используя принятые допущения, из соотношения вида $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{il}$ могут быть количественным образом оценены и предельно допустимые амплитуды плотности δ_{ilm} тока в материалах жил (оболочек) исследуемых проводов (кабелей) для аварийного режима КЗ.

2.3. Результаты уточненного расчетного выбора предельно допустимых сечений S_{il} и плотностей тока δ_{il} в проводах и кабелях цепей электроустановок общепромышленного назначения. В табл. 5 приведены результаты уточненного расчета по (1) с учетом данных табл. 2 и 4 предельно допустимых поперечных сечений S_{il} токонесущих медных (алюминиевых) частей проводов и кабелей силовых цепей электроустановок общепромышленного назначения при $J_{il} \neq 0$, $t_{kC} = 100$ мс и амплитуде I_{mk} тока КЗ, изменяющейся дискретно в диапазоне (30-100) кА.

Таблица 5

Значения предельно допустимых сечений S_{il} для проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения с амплитудой I_{mk} тока $i_k(t)$ КЗ от 30 до 100 кА (для $t_{kC} = 100$ мс и $T_a = 20$ мс)

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электроустановки	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значение сечения S_{il} , мм ²			
		Амплитуда I_{mk} установившегося тока КЗ, кА			
		30	50	70	100
Без изоляции	Медь	47,11	78,51	109,91	157,02
	Алюминий	83,51	139,17	194,84	278,35
ПВХ, Р	Медь	63,35	105,58	147,81	211,16
	Алюминий	99,30	165,51	231,71	331,01
ПЭТ	Медь	76,55	127,58	178,61	255,15
	Алюминий	118,52	197,54	276,55	395,08

Из данных табл. 5 следует, что предельно допустимые амплитуды плотности $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{il}$ тока КЗ при времени его протекания (отключения) $t_{kC} = 100$ мс для неизолированных проводов с медными и алюминиевыми жилами в цепях электроустановок общепромышленного назначения ($T_a = 20$ мс) составляют примерно 0,64 кА/мм² и 0,36 кА/мм² соответственно, для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ и Р изоляцией – 0,47 (0,30) кА/мм², а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 0,39 (0,25) кА/мм². Отметим, что указанные численные значения предельно допустимых амплитуд плотности δ_{ilm} тока КЗ в материалах токонесущих частей проводов (кабелей) не зависят от уровня амплитуды I_{mk} установившегося аварийного тока промышленной частоты 50 Гц в них.

В табл. 6 представлены результаты уточненного определения по (1) с учетом данных табл. 2 и 4 для случая $J_{il} \neq 0$ предельно допустимых поперечных сечений S_{il} токонесущих медных (алюминиевых) частей проводов и кабелей силовых цепей электроустановок общепромышленного назначения при $t_{kC} = 160$ мс и амплитуде I_{mk} установившегося тока КЗ, изменяющейся дискретно в диапазоне (30-100) кА ($T_a = 20$ мс).

Таблица 6

Значения предельно допустимых сечений S_{il} для проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения с амплитудой I_{mk} тока $i_k(t)$ КЗ от 30 до 100 кА (для $t_{kc}=160$ мс и $T_a=20$ мс)

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электроустановки	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значение сечения S_{il} , мм ²			
		Амплитуда I_{mk} установившегося тока КЗ, кА			
		30	50	70	100
Без изоляции	Медь	57,69	96,15	134,61	192,31
	Алюминий	102,27	170,45	238,64	340,91
ПВХ, Р	Медь	77,58	129,31	181,03	258,62
	Алюминий	121,62	202,70	283,78	405,40
ПЭТ	Медь	93,75	156,25	218,75	312,50
	Алюминий	145,16	241,93	338,71	483,87

Из данных табл. 6 получаем, что при времени протекания (отключения) тока КЗ $t_{kc}=160$ мс вне зависимости от численного значения токовой амплитуды I_{mk} предельно допустимые амплитуды плотности $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{il}$ аварийного тока для неизолированных проводов с медными и алюминиевыми жилами в цепях электроустановок общепромышленного назначения ($T_a=20$ мс) составляют около 0,52 кА/мм² и 0,29 кА/мм² соответственно, для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ и Р изоляцией – 0,39 (0,25) кА/мм², а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 0,32 (0,21) кА/мм². Из анализа данных табл. 5 и 6 для уточненных значений предельно допустимых сечений S_{il} токонесущих частей КПП в силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения ($J_{ill} \neq 0$; $T_a=20$ мс) можно заключить, что для указанных амплитуд I_{mk} установившегося тока КЗ, удовлетворяющих диапазону (30-100) кА, увеличение времени отключения t_{kc} тока КЗ в 1,6 раза (со 100 мс до 160 мс) приводит к уменьшению предельно допустимых амплитуд плотности δ_{ilm} тока КЗ в материалах рассматриваемых проводов и кабелей примерно в 1,2 раза. При этом во столько же раз (в ~1,2 раза) возрастают и значения предельно допустимых поперечных сечений S_{il} медных (алюминиевых) жил и оболочек (обратных токопроводов) исследуемой КПП. Отсюда следует подкрепленная приведенными уточненными инженерными расчетами величин S_{il} и δ_{ilm} практическая рекомендация для условий эксплуатации электроустановок общепромышленного назначения: в их силовых цепях для обеспечения термической стойкости КПП время отключения t_{kc} тока КЗ (типы пофазно применяемых релейных защит и выключателей в ЭС) и практически выбранные значения предельно допустимых сечений S_{il} их токонесущих частей должны быть в обязательном порядке взаимно согласованы.

2.4. Расчетная оценка термической стойкости электрических проводов и кабелей в цепях электроустановок общепромышленного назначения. В рамках предлагаемого подхода к выбору предельно допустимых поперечных сечений S_{il} проводов (кабелей) в силовых цепях электроустановок общепромышленного назначения может быть наглядным об-

разом осуществлена и расчетная оценка их термической стойкости. С этой целью, как и в [1, 6], термическую стойкость рассматриваемых проводов и кабелей в цепях исследуемых электроустановок будем определять по следующему теплофизическому условию:

$$\theta_{iS} \leq \theta_{IS}, \quad (7)$$

где θ_{iS} , θ_{IS} – соответственно текущая (конечная) и предельно допустимая кратковременная температуры нагрева токонесущих частей рассматриваемых электрических проводов и кабелей в силовых цепях ЭС.

Для нахождения в (7) значений текущей или конечной температуры θ_{iS} нагрева материала токонесущих частей КПП, определяемой джоулевым теплом от действия на него тока $i_k(t)$ КЗ, первоначально используем известную нелинейную зависимость удельной электропроводности γ_i материала жилы (оболочки) провода или кабеля от величины температуры θ_{iS} [5]:

$$\gamma_i = \gamma_{0i} [1 + c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{iS} - \theta_0)]^{-1}. \quad (8)$$

Следует отметить, что соотношение (8) в интервале температур от 20 °С до температуры плавления материалов жил (оболочек) КПП согласно экспериментальным данным из [5] аппроксимирует температурную зависимость величины γ_i для меди и алюминия с погрешностью не более 5 %. Кроме того, заметим, что, как раньше, так и в (8), под величиной γ_{0i} понимается удельная электропроводность γ_i материала токонесущих частей КПП при температуре $\theta_0=20$ °С. Учитывая (8), решение неоднородного дифференциального уравнения первого порядка для конечной температуры θ_{iS} джоулевого нагрева током $i_k(t)$ КЗ материала жилы (оболочки) КПП в цепи электроустановки общепромышленного назначения при начальном условии вида $[\theta_{iS}(t=0) - \theta_{0i}] = 0$ может быть записано в следующем приближенном аналитическом виде [6]:

$$\theta_{iS} = \theta_{0i} + (c_{0i} \beta_{0i})^{-1} \left[\exp(J_{ak} \gamma_{0i}^{-1} \beta_{0i} / S_{il}^2) - 1 \right], \quad (9)$$

где θ_{0i} – первоначальная температура материала токонесущих частей КПП, составляющая в зависимости от режима работы силовых цепей электрооборудования величину θ_{il} ($J_{ill} \neq 0$) или величину $\theta_0 = 20$ °С ($J_{ill} = 0$).

Из (9) видно, что при принятых допущениях, известных численных значениях теплофизических характеристик γ_{0i} , c_{0i} и β_{0i} для используемых материалов токонесущих частей КПП (см. данные табл. 1 и [5]), а также для найденных по (1) и (6) численных значений предельно допустимых поперечных сечений S_{il} медных (алюминиевых) жил (оболочек) проводов (кабелей) и интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ КЗ определение искомой величины конечной температуры θ_{iS} не вызывает ни каких электротехнических затруднений.

В качестве одного из примеров (*первый пример*) практической реализации полученных результатов осуществим при $\theta_{0i}=\theta_{il}=70$ °С ($J_{ill} \neq 0$) по (7) и (9) расчетную оценку термической стойкости неизолированного (оголенного) медного провода силовой цепи электрооборудования общепромышленного назначения для аварийного случая, когда $t_{kc}=160$ мс, $T_a=20$ мс и $I_{mk}=100$ кА. Согласно приведенным расчетным данным (см. табл. 6) предельно допустимое сечение S_{il} принятого провода численно составляет примерно 192,31 мм². В этом случае величина интеграла дейст-

вия J_{ak} тока $i_k(t)$ КЗ по (6) будет численно составлять около $9 \cdot 10^8 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ (см. табл. 4). Тогда по (9) с учетом данных табл. 1 конечная температура θ_{iS} джоулева нагрева аварийным током $i_k(t)$ КЗ рассматриваемого медного провода окажется примерно численно равной $212,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Видно, что это значение температуры меньше нормированного значения предельно допустимой кратковременной температуры θ_{iS} нагрева проверяемого на термическую стойкость медного провода силовой цепи электрооборудования, составляющего согласно [1] $250 \text{ }^\circ\text{C}$ при тяжении в нем (проводе) менее 20 Н/мм^2 . Поэтому можно заключить, что условие (7) для указанного расчетного случая выполняется.

Расчетная оценка по (9) при прежних исходных данных ($\theta_0 = \theta_{iI} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{kC} = 160 \text{ мс}$; $T_a = 20 \text{ мс}$; $I_{mk} = 100 \text{ кА}$; $J_{ak} = 9 \cdot 10^8 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$) конечной температуры θ_{iS} джоулева нагрева медной круглой жилы кабеля с ПВХ или Р изоляцией (второй пример) с предельно допустимым поперечным сечением $S_{iI} = 258,62 \text{ мм}^2$ (см. табл. 6) показывает, что в данном случае она достигает уровня, равного примерно $139,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Эта температура меньше нормированного уровня предельно допустимой кратковременной температуры θ_{iS} нагрева проверяемого на термическую стойкость кабеля с ПВХ (Р) изоляцией, составляющего $150 \text{ }^\circ\text{C}$ [1]. Как видим, и для данного расчетного случая условие (7) также выполняется. В этой связи можно обоснованно говорить о том, что выполненные расчетные оценки термической стойкости как неизолированного медного провода, так и кабеля с медной жилой, ПВХ и Р изоляцией силовых цепей исследуемых электроустановок указывают на работоспособность предложенного электро-технического подхода к уточненному расчетному выбору предельно допустимых сечений S_{iI} токонесущих частей КПП, применяемой в силовых цепях электрооборудования промышленной электроэнергетики.

Выводы.

1. Предложенный инженерный электротехнический подход позволяет по условию термической стойкости КПП силовых цепей электрооборудования общепромышленного назначения осуществлять уточненный расчетный выбор предельно допустимых поперечных сечений S_{iI} неизолированных проводов, изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками-экранами) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, токонесущие части которых в аварийном режиме их работы могут испытывать воздействие тока $i_k(t)$ трехфазного КЗ в ЭЭС с заданными нормированными документами АВП.

2. Показано, что расхождение между численными значениями коэффициента C_{ik} , входящего в формулу (1) и определяющего величины предельно допустимых поперечных сечений S_{iI} токонесущих частей КПП в цепях электроустановок общепромышленного назначения, по существу отсутствующему и предложенному инженерным электротехническим подходам к расчетному выбору предельно допустимых поперечных сечений S_{iI} жил (оболочек) рассматриваемых электрических проводов и кабелей для нормального режима их работы при $J_{iI} \neq 0$ (при номинальной токовой нагрузке КПП) составляет не более (3-8) %, а при $J_{iI} = 0$ (в режиме обесточивания КПП) достигает до (9-26) %.

3. Получено аналитическое соотношение (6) для уточненного расчетного определения величины интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ КЗ (интеграла Джоуля B_k) в силовых цепях исследуемого электрооборудования, позволяющее при заданных значениях амплитуды I_{mk} установившегося тока КЗ, длительности (времени отключения) t_{kC} процесса КЗ, постоянной времени спада T_a аperiodической составляющей тока $i_k(t)$ КЗ и периода колебаний $T_p = 20 \text{ мс}$ периодической составляющей аварийного тока КЗ сравнительно легко находить требуемые для расчетного выбора предельно допустимых поперечных сечений S_{iI} токонесущих частей рассматриваемой КПП значения интеграла J_{ak} .

4. Установлено, что в первом приближении в силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения ($T_a = 20 \text{ мс}$) предельно допустимые амплитуды плотности $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{iI}$ тока $i_k(t)$ КЗ при времени его отключения $t_{kC} = 100 \text{ мс}$ в ЭЭС для неизолированных проводов с медными (алюминиевыми) жилами составляют соответственно около $0,64$ ($0,36$) кА/мм^2 , для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПВХ (Р) изоляцией – $0,47$ ($0,30$) кА/мм^2 , а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – $0,39$ ($0,25$) кА/мм^2 . При увеличении в ЭЭС времени отключения t_{kC} тока $i_k(t)$ КЗ в указанных цепях ($T_a = 20 \text{ мс}$) предельно допустимые амплитуды плотности δ_{ilm} аварийного тока КЗ уменьшаются и при $t_{kC} = 160 \text{ мс}$ для неизолированных проводов с медными (алюминиевыми) жилами составляют соответственно примерно $0,52$ ($0,29$) кА/мм^2 , для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПВХ (Р) изоляцией – $0,39$ ($0,25$) кА/мм^2 , а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – $0,32$ ($0,21$) кА/мм^2 .

5. Предложено удобное в практическом использовании аналитическое соотношение (9) для выполнения по условию (7) расчетной оценки термической стойкости к действию тока $i_k(t)$ КЗ указанных электрических проводов и кабелей, широко применяемых в силовых цепях электрооборудования общепромышленного назначения.

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. Справочник по проектированию электрических сетей и оборудования / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
3. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Высшая школа, 1972. – 432 с.
4. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
6. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

REFERENCES

1. Orlov I.N. *Elektrotehnicheskij spravocnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoj 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. Barybin Yu.G. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey i oborudovaniya* [Handbook per planning electrical circuit and equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 464 p. (Rus).
 3. Knyazevskiy B.A., Lipkin B.Yu. *Elekrosnabzhenie promyshlennyykh predpriyatij* [Electric supply industrial organization]. Moscow, High school Publ., 1972. 432 p. (Rus).
 4. 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).
 5. Knopfel' G. *Sverkhsil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
 6. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Monografiya v 3 tomah. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Monograph in 3 vols. Vol. 3: Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).

Поступила (received) 17.12.2018

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.

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.

Purpose. Implementation and clarification of the existing engineering approach for determination in industrial power engineering for allowable sections of cable-conductor products (CCP) S_{il} of electric wires and cables in the circuits of electrical equipment of the general industrial installations characterized flowing in malfunction of current $i_k(t)$ of short circuit (SC) with different amplitude-temporal parameters (ATPs). **Methodology.** Scientific and technical bases of electrical power engineering, electrophysics bases of technique of high voltage and high pulse currents, theoretical bases of the electrical engineering. **Results.** The results of the developed engineering approach are resulted

in the calculation determination on the condition of thermal resistibility of CCP permissible sections of S_{il} of the uninsulated wires, insulated wires and cables with copper (aluminum) cores (shells), polyvinyl chloride (PVC), rubber (R) and polyethylene (PET) insulation, on which in malfunction of their operation the current $i_k(t)$ of SC can flow with the set by normative documents of ATP. It is shown that divergence between the values of basic calculation coefficient of C_{ik} by existing and offered to the engineering calculations selection of permissible sections of S_{il} of cores (shells) of the tested wires and cables for normal of their operating time at the nominal current load of CCP makes no more (3-8) %, and in the mode of de-energizing of CCP arrives at to (9-26) %.. Analytical correlation is got for the specified calculation determination of integral of action of J_{ak} of current $i_k(t)$ of SC (Joule integral) in the power circuits of the tested electrical equipment. It is set that in the circuits of of the general industrial installations (for permanent time of slump of $T_a=20$ ms of aperiodic constituent of current of SC) maximum possible amplitudes of density of $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{il}$ of SC current at time of his disconnecting $t_{kc}=100$ ms for the uninsulated wires with copper (aluminum) cores make according to approximately 0.64 (0.36) $\kappa A/mm^2$, for cables with copper (aluminum) cores (shells), PVC and R insulation – 0.47 (0.30) $\kappa A/mm^2$, and for cables with copper (aluminum) cores (shells) and PET insulation – 0.39 (0.25) $\kappa A/mm^2$. At time of disconnecting $t_{kc}=160$ ms of SC current in the circuits of electrical equipment ($T_a=20$ ms) permissible amplitudes of current density of δ_{ilm} of SC for the unisolated wires with copper and aluminum cores are accordingly about 0.52 (0.29) $\kappa A/mm^2$, for cables with copper (aluminum) cores (shells), PVC and R insulation of 0.39 (0.25) $\kappa A/mm^2$, and for cables with copper (aluminum) cores (shells) and PET insulation – 0.32 (0.21) $\kappa A/mm^2$. **Originality.** First by a calculation the specified numeral values of sections of S_{il} and amplitudes of density δ_{ilm} of SC current are determined for the uninsulated wires, insulated wires and cables with copper (aluminum)cores shells), PVC, R and PET insulation. New analytical correlation is offered for the calculation estimation of thermal resistibility of tested CCP to the action of current of SC. **Practical value.** The obtained results will be useful in the increase of thermal resistibility of CCP with copper (aluminum) cores (shells), PVC, R and PET insulation, widely applied in the power circuits of electrical equipment of the general purpose industrial installations. References 6, tables 6.

Key words: electric power engineering, electric wires and cables of circuits of electrical installations of the general industrial purpose, calculation selection of allowable sections of wires and cables in the circuits of electrical equipment.