

М.И. Баранов

**ВЫБОР ДОПУСТИМЫХ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ В БОРТОВЫХ ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Надані результати запропонованого інженерного електротехнічного підходу до розрахункового вибору гранично допустимих поперечних 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 у бортових силових колах електрообладнання літальних апаратів (ЛА) в аварійному режимі протікає струм  $i_k(t)$  однофазного короткого замикання (КЗ) із заданими амплітудно-часовими параметрами. На підставі цього підходу здійснений вибір гранично допустимих поперечних перерізів  $S_{ij}$  для вказаних дротів (кабелів) бортових силових кіл електрообладнання ЛА з частотою змінного струму  $f=400$  Гц. Виконана розрахункова оцінка гранично допустимих амплітуд щільності  $\delta_{lim}$  струму  $i_k(t)$  вказаного КЗ в даних дротах і кабелях бортових силових кіл ЛА. Бібл. 18, табл. 5.*

*Ключові слова:* літальний апарат, бортові силові кола електрообладнання, електричні дроти і кабелі, частота змінного струму, вибір гранично допустимих перерізів кабельно-провідникової продукції.

*Приведены результаты предложенного инженерного электротехнического подхода к расчетному выбору предельно допустимых поперечных 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 бортовых силовых цепях электрооборудования летательных аппаратов (ЛА) в аварийном режиме протекает ток  $i_k(t)$  однофазного короткого замыкания (КЗ) с заданными амплитудно-временными параметрами. На основании этого подхода осуществлен выбор предельно допустимых поперечных сечений  $S_{ij}$  для указанных проводов (кабелей) бортовых силовых цепей электрооборудования ЛА с частотой переменного тока  $f=400$  Гц. Выполнена расчетная оценка предельно допустимых амплитуд плотности  $\delta_{lim}$  тока  $i_k(t)$  указанного КЗ в рассматриваемых проводах и кабелях бортовых силовых цепей ЛА. Библ. 18, табл. 5.*

*Ключевые слова:* летательный аппарат, бортовые силовые цепи электрооборудования, электрические провода и кабели, частота переменного тока, выбор предельно допустимых сечений кабельно-проводниковой продукции.

**Введение.** В [1, 2] применительно к задачам промышленной электроэнергетики были рассмотрены вопросы уточненного выбора предельно допустимых  $S_{ij}$  и критических  $S_{ic}$  сечений электрических неизолированных проводов, а также изолированных проводов и кабелей с поливинилхлоридной (ПВХ), резиновой (Р) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией и медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) по условиям их соответственно термической стойкости и электрического взрыва (ЭВ). Как известно, расчетными режимами при выборе предельно допустимых сечений  $S_{ij}$  кабельно-проводниковой продукции (КПП), используемой в силовых цепях электрооборудования с переменным током частотой  $f=50$  Гц, являются режимы одно- или трехфазного короткого замыкания (КЗ) [3, 4]. Приведенные в [1-4] технические данные для выбора КПП касаются силовых цепей электрооборудования, применяемого в наземных стационарных объектах при их промышленном электроснабжении переменным током частотой  $f=50$  Гц. А как быть с выбором предельно допустимых сечений  $S_{ij}$  КПП объектов авиационной и ракетно-космической техники, в бортовых электрических сетях которых возможно применение переменного тока частотой  $f$ , существенно отличающейся от традиционной промышленной частоты 50 Гц? Ведь не секрет, что массогабаритные показатели бортовой КПП, а значит и значения поперечных сечений  $S_{ij}$  ее металлических жил (оболочек-экранов), для подобных объектов «выходят» для разработчиков указанной наукоемкой техники на первый план. В этой части следует заметить, что, например, на современном авиалайнере «Airbus 380» протяженность КПП его бортовой сети составляет более 530 км

[5]. При этом суммарная мощность источников электроэнергии на борту летательных аппаратов (ЛА) военного и гражданского назначения может составлять от 20 кВт для легких ЛА до 600 кВт и более для тяжелых ЛА [6]. В этой связи актуальными в области прикладной электротехники применительно к современным ЛА становятся задачи, связанные с исследованиями особенностей применения в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА переменного тока частотой  $f>50$  Гц и выбор для таких частот  $f$  переменного тока в бортовых сетях ЛА предельно допустимых сечений  $S_{ij}$  их электрических проводов и кабелей, содержащих внутренние медные (алюминиевые) жилы ( $i=1$ ) и наружные обратные (защитные) оболочки ( $i=2$ ), а также ПВХ, Р и ПЭТ поясную изоляцию.

**Целью статьи** является выполнение выбора предельно допустимых поперечных сечений  $S_{ij}$  неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в бортовых силовых цепях электрооборудования различных ЛА с переменным током частотой  $f>50$  Гц.

**1. Постановка задачи.** Рассмотрим широко используемые в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА неизолированные медные и алюминиевые провода, а также изолированные провода и кабели с медными (алюминиевыми) внутренними жилами и наружными оболочками-экранами, имеющие ПВХ, Р и ПЭТ поясную (защитную) изоляцию [7]. Принимаем, что по круглым сплошным (расщепленным) медным (алюминиевым) жилам (оболочкам) указанных проводов (кабелей) силовых цепей электрооборудования ЛА, находящихся в воздушной атмосфере с

© М.И. Баранов

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  $\theta_{II}$  джоулевого нагрева для не- и изолированных проводов (кабелей) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией численно не превышает регламентируемых действующими требованиями для электротехнических устройств уровней в 70 °С и 65 °С соответственно [8]. Пусть для общности решаемой электротехнической задачи в силовых цепях ЛА с КПП возможны режимы их работы, когда какие-то участки их проводов (кабелей) могут быть полностью обесточены. Считаем, что термическая стойкость рассматриваемых электрических проводов и кабелей бортовых цепей ЛА, как и для наземного стационарного электрооборудования с двухпроводной сетью электропитания, лимитируется предельно допустимой кратковременной температурой  $\theta_{IS}$  нагрева токонесущих частей проводов (кабелей) при однофазном виде КЗ в исследуемой бортовой сети ЛА. В первом приближении решения формулируемой задачи полагаем, что значения  $\theta_{IS}$  соответствуют известным предельно допустимым кратковременным температурам нагрева КПП переменным током КЗ промышленной частоты  $f=50$  Гц [8]. В этой связи численные значения температуры  $\theta_{IS}$  для неизолированных медных проводов при тяжениях менее 20 Н/мм<sup>2</sup> будут составлять 250 °С, а для неизолированных алюминиевых проводов при тяжениях менее 10 Н/мм<sup>2</sup> – 200 °С [8]. Для изолированных проводов и кабелей с медными и алюминиевыми жилами, ПВХ и Р изоляцией численные значения температуры  $\theta_{IS}$  тогда оказываются равными 150 °С, а для рассматриваемой КПП с ПЭТ изоляцией – 120 °С [8]. Допускаем, что при выборе сечений  $S_{II}$  электрический ток  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА, выполненной по одно- или двухпроводной схеме, практически равномерно распределяется по поперечному сечению жилы и оболочки-экрана исследуемого провода (кабеля). Обоснованием такому допущению является то, что минимальная глубина проникновения  $\Delta_i$  магнитного поля (толщина скин-слоя) от тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА в квазистационарном приближении в рассматриваемые проводниковые ферромагнитные материалы жилы (оболочки-экрана), определяемая из расчетного соотношения  $\Delta_i \approx [1/(\pi f \mu_0 \gamma_{0i})]^{1/2}$  [9], 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, например, для частот аварийного тока  $f=50$  Гц и  $f=400$  Гц численно составляет для меди ( $\gamma_{0i}=5,81 \cdot 10^7 \cdot (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ ) соответственно около 9,3 и 3,3 мм, а для алюминия ( $\gamma_{0i}=3,61 \cdot 10^7 \cdot (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ ) – 11,8 и 4,2 мм. Видно, что указанные значения толщин скин-слоя  $\Delta_i$  оказываются соизмеримыми с радиусами (толщинами) токонесущих жил (оболочек) проводов и кабелей, обычно используемыми в цепях электрооборудования рассматриваемых ЛА (в частности, в сетях авиационной техники [7]). Как и в [1, 2] воспользуемся условием адиабатического характера протекающих при временах  $t_{kC}$  действия тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА не более  $t_{kC}=40f^{-1}=100$  мс в провод-

никовых 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 электропроводящих материалов и изоляции на джоулев нагрев токонесущих частей жил (оболочек) исследуемых проводов (кабелей) можно пренебрегать. Требуется расчетным путем в приближенном виде с учетом нелинейного характера изменения из-за джоулевого нагрева исследуемой КПП величины удельной электропроводности  $\gamma_i$  материала ее жил (оболочек) и условия термической стойкости КПП к действию тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА определить в диапазоне изменения частоты переменного тока  $f=(50-400)$  Гц в силовых цепях ее электрооборудования предельно допустимые поперечные сечения  $S_{II}$  токонесущих частей для неизолированных медных (алюминиевых) проводов, а также для изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, по которым в аварийном режиме работы однопроводной бортовой сети ЛА (с общим «минусом» на его массивном металлическом корпусе, служащим обратным токопроводом [10]) или двухпроводной бортовой сети ЛА [11] протекает ток  $i_k(t)$  однофазного КЗ известной длительности  $t_{kC}$  и с заданными амплитудно-временными параметрами (АВП). Кроме того, с учетом нахождения поперечных сечений  $S_{II}$  необходимо для исследуемой КПП в ЛА определить и предельно допустимые амплитуды плотности  $\delta_{ilm}$  тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА.

**2. Инженерный подход к выбору предельно допустимых сечений  $S_{II}$  проводов и кабелей в цепях электрооборудования ЛА.** Из уравнения теплового баланса для токонесущих частей КПП бортовых цепей электрооборудования ЛА в адиабатическом режиме и условия их термической стойкости к току  $i_k(t)$  указанного КЗ аналитическое выражение для расчетного определения предельно допустимых поперечных сечений  $S_{II}$  рассматриваемых электрических проводов и кабелей приобретает следующий вид [1]:

$$S_{II} = [J_{ak} / (J_{IS} - J_{ill})]^{1/2} = J_{ak}^{1/2} / C_{ik}, \quad (1)$$

где  $J_{ak} = \int_0^{t_{kC}} i_k^2(t) dt$  – интеграл Джоуля (действия) тока

$i_k(t)$  однофазного КЗ, А<sup>2</sup>·с;  $J_{IS}$ ,  $J_{ill}$  – интегралы тока для токонесущих частей проводов (кабелей), предельно допустимая кратковременная температура и длительно допустимая температура нагрева материала которых равны  $\theta_{IS}$  и  $\theta_{II}$  соответственно, А<sup>2</sup>·с·м<sup>-4</sup>;  $C_{ik} = (J_{IS} - J_{ill})^{1/2}$  – расчетный коэффициент, А·с<sup>1/2</sup>·м<sup>-2</sup>.

Из (1) однозначно следует то, что для расчетного определения величин сечений  $S_{II}$  необходимо знать значения интеграла Джоуля  $J_{ak}$  и коэффициента  $C_{ik}$ .

**2.1. Определение интегралов тока  $J_{IS}$ ,  $J_{ill}$  и коэффициента  $C_{ik}$  для КПП бортовой сети ЛА.** Для расчета с инженерной точностью величин входящих в (1) интегралов тока  $J_{IS}$  и  $J_{ill}$ , применяемых, в частности, в [9] в виде интегралов тока или инерции (см. формулу 4.56), подынтегральная функция которых в отличие от классического интеграла Джоуля

содержит не квадрат аварийного тока  $i_k(t)$ , а квадрат плотности данного тока  $\delta_{ik}(t)$  в электропроводящих материалах КПП бортовой сети ЛА, используем следующие приближенные аналитические выражения [1, 12]:

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

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

где  $c_{0i}$ ,  $\beta_{0i}$  – соответственно количественно определяемые при  $\theta_0=20^\circ\text{C}$  удельная объемная теплоемкость ( $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ) и тепловой коэффициент удельной электропроводности ( $\text{м}^3/\text{Дж}$ ) проводящего материала жилы (оболочки) провода (кабеля) бортовой силовой цепи электрооборудования ЛА с током частотой  $f > 50$  Гц до воздействия на КПП аварийного тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА с заданными АВП.

В табл. 1 приведены численные значения используемых в (2) и (3) электрофизических параметров  $\gamma_{0i}$ ,  $c_{0i}$  и  $\beta_{0i}$  для основных проводниковых материалов, применяемых в токонесущих частях КПП бортовой сети ЛА при температуре, равной  $\theta_0=20^\circ\text{C}$  [9, 12].

Таблица 1

Численные значения характеристик основных материалов токонесущих жил (оболочек) не- и изолированных проводов (кабелей) силовых цепей электрооборудования бортовой сети ЛА при  $\theta_0=20^\circ\text{C}$  [9, 12]

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

Используя значения указанных характеристик  $\gamma_{0i}$ ,  $c_{0i}$  и  $\beta_{0i}$  (см. табл. 1), при заданных величинах нормированных температур  $\theta_0$ ,  $\theta_{IS}$  и  $\theta_{Il}$  с помощью (2) и (3) могут быть найдены численные значения искомых интегралов тока  $J_{iIS}$ ,  $J_{iIl}$  и коэффициента  $C_{ik}$ , используемого в (1), для широкой номенклатуры КПП, применяемой в бортовых силовых цепях электрооборудования тех или иных ЛА. В табл. 2 указаны численные значения расчетного коэффициента  $C_{ik}$  для основных исполнений КПП, широко применяемой в бортовых силовых цепях электрооборудования различных ЛА.

Таблица 2

Численные значения коэффициента  $C_{ik}$  для не- и изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), применяемых в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА [1]

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электрооборудования ЛА	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Численное значение $C_{ik}$ , $10^8 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{м}^2$	
		$J_{iIl} \neq 0$	$J_{iIl} = 0$
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

В табл. 2 случай, когда  $J_{iIl} \neq 0$ , соответствует номинальной токовой нагрузке КПП в бортовых силовых

цепях исследуемого электрооборудования ЛА (температура их токонесущих частей равна  $\theta_{Il}$ ), а случай при  $J_{iIl} = 0$  – режиму обесточивания КПП в ЛА (температура их токонесущих частей до протекания по ним тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА соответствует температуре окружающей КПП воздушной среды, принятой нами равной  $\theta_0=20^\circ\text{C}$ ). Далее остановимся на нахождении интеграла Джоуля  $J_{ak}$ , являющегося основным параметром для расчетного определения по (1) величины искомого сечения  $S_{il}$ .

**2.2. Определение интеграла действия  $J_{ak}$  аварийного тока при КЗ в бортовой сети ЛА.** Для этого первоначально запишем аналитическое соотношение, описывающее изменение во времени  $t$  тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовых силовых цепях электрооборудования, используемого в различных самолетах и ракетах-носителях и запитанного от бортового источника переменного тока частотой  $f > 50$  Гц. Согласно [1, 4] АВП этого тока  $i_k(t)$  КЗ в бортовой сети ЛА, содержащей активные и реактивные сопротивления, будут подчиняться следующей временной зависимости:

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

где  $I_{mk}$  – амплитуда установившегося в силовой цепи электрооборудования ЛА тока  $i_k(t)$  КЗ, А;  $T_a$  – постоянная времени спада аperiodической составляющей аварийного тока  $i_k(t)$  КЗ в бортовой цепи ЛА, с.

Из (4) при  $f=400$  Гц и  $t=1,25$  мс, соответствующем наибольшей амплитуде ударного тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА, следует аналитическое выражение для расчетного ударного коэффициента  $k_s$ , характерного для рассматриваемой бортовой системы электроснабжения ЛА в аварийном режиме:

$$k_s = [1 + \exp(-0,00125/T_a)]. \quad (5)$$

При  $T_a=3$  мс согласно (5) значение ударного коэффициента  $k_s$  оказывается численно равным 1,66. Поэтому при рабочем напряжении переменного тока частотой  $f=400$  Гц в бортовой сети ЛА, вырабатываемом, например, бортовым преобразователем типа ПОС-1000 и равном 115 В [6], в режиме однофазного КЗ амплитуда тока отключения в соответствии с данными [13-15] может достигать уровня в (2-25) кА.

Тогда с учетом (1) и (4) выражение для искомого интеграла действия  $J_{ak}$  тока  $i_k(t)$  КЗ в бортовой цепи электрооборудования ЛА в принятом приближении приобретает следующий аналитический вид [1]:

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

Из (6) следует, что значения интеграла действия  $J_{ak}$  тока  $i_k(t)$  КЗ в бортовой системе электроснабжения ЛА прямо пропорциональны квадрату амплитуды  $I_{mk}$  установившегося тока КЗ и длительности  $t_{kC}$  (времени отключения, равному времени срабатывания  $t_a$  бортовых устройств защиты [13, 14]) протекания рассматриваемого КЗ. Видно, что чем больше численные значения величин  $I_{mk}$  и  $t_{kC}$ , тем будут большими и численные значения искомой величины интеграла  $J_{ak}$ . В табл. 3 при  $T_a=3$  мс ( $f=400$  Гц) для четырех фиксиро-

ванных численных значений амплитуды  $I_{mk}$  установившегося тока КЗ (3, 5, 10 и 30 кА) и двух возможных согласно [13, 14] численных значений длительности  $t_{kC}$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА (5 и 100 мс) приведены численные значения интеграла действия  $J_{ak}$  тока  $i_k(t)$  указанного КЗ, рассчитанные по (6).

Таблица 3

Численные значения интеграла действия  $J_{ak}$  для тока  $i_k(t)$  КЗ по (4), протекающего в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА ( $f=400$  Гц;  $T_a=3$  мс)

Численное значение амплитуды $I_{mk}$ установившегося тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой силовой цепи электрооборудования ЛА, кА	Значение интеграла действия $J_{ak}$ для тока $i_k(t)$ КЗ по (4), А <sup>2</sup> ·с	
	$t_{kC}=5$ мс	$t_{kC}=100$ мс
3	$3,55 \cdot 10^4$	$4,63 \cdot 10^5$
5	$9,86 \cdot 10^4$	$12,86 \cdot 10^5$
10	$39,46 \cdot 10^4$	$51,44 \cdot 10^5$
30	$35,51 \cdot 10^5$	$46,30 \cdot 10^6$

Определив по (6) значения интеграла действия  $J_{ak}$  тока  $i_k(t)$  КЗ (см. табл. 3) и зная численные значения коэффициента  $C_{ik}$  (см. табл. 2), на основании (1) могут быть найдены численные значения предельно допустимых сечений  $S_{il}$  токонесущих частей рассматриваемой КПП в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА. Используя принятые допущения, при заданных амплитудах  $I_{mk}$  из соотношения вида  $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{il}$  могут быть количественным образом оценены и предельно допустимые амплитуды плотности  $\delta_{ilm}$  тока в материалах жил (оболочек) исследуемой КПП бортовой сети ЛА для аварийного режима КЗ.

**2.3. Результаты выбора предельно допустимых сечений  $S_{il}$  и плотностей тока  $\delta_{ilm}$  в проводах и кабелях бортовой сети ЛА.** В табл. 4 приведены результаты расчета по (1) с учетом данных, сведенных в табл. 2 и 3, предельно допустимых сечений  $S_{il}$  токонесущих медных (алюминиевых) частей КПП бортовых силовых цепей электрооборудования ЛА при  $f=400$  Гц,  $J_{ill} \neq 0$ ,  $t_{kC}=5$  мс и амплитуде  $I_{mk}$  тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети самолета (ракеты-носителя), изменяющейся дискретно в диапазоне (3-30) кА.

Таблица 4

Значения предельно допустимых сечений  $S_{il}$  для проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА с амплитудой  $I_{mk}$  тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ от 3 до 30 кА ( $f=400$  Гц;  $J_{ill} \neq 0$ ;  $t_{kC}=5$  мс;  $T_a=3$  мс)

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электрооборудования ЛА	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значение сечения $S_{il}$ , мм <sup>2</sup>			
		Амплитуда $I_{mk}$ установившегося тока КЗ, кА			
		3	5	10	30
Без изоляции	Медь	1,21	2,01	4,03	12,08
	Алюминий	2,14	3,57	7,14	21,41
ПВХ, Р	Медь	1,62	2,71	5,41	16,24
	Алюминий	2,55	4,24	8,49	25,46
ПЭТ	Медь	1,96	3,27	6,54	19,63
	Алюминий	3,04	5,06	10,13	30,39

Следует указать, что вопросы выбора предельно допустимых поперечных сечений  $S_{il}$  жил (оболочек-

экранов) исследуемой КПП для случая, когда  $f=50$  Гц ( $J_{ill} \neq 0$ ;  $t_{kC}=(100-160)$  мс;  $I_{mk}=(30-100)$  кА;  $T_a=20$  мс) были подробно рассмотрены автором в [1]. Сравнивая данные для  $S_{il}$  из указанной выше табл. 4 и из табл. 5 в [1], можно заключить, что переход в бортовой сети ЛА на частоту переменного тока  $f=400$  Гц (в восемь раз большую частоты  $f=50$  Гц, используемой в силовых цепях электроэнергетических объектов наземного базирования) позволяет за счет применения в бортовой сети ЛА быстродействующих автоматов защиты от КЗ (например, типа АЗ-250 на токи амплитудой до 6 кА) [13, 14] и соответственно резкого уменьшения при  $f=400$  Гц времени  $t_{kC}$  действия тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА (со 100 мс до 5 мс) существенно уменьшить численные значения предельно допустимых сечений  $S_{il}$  ее медных (алюминиевых) проводов и кабелей (для аварийного режима при  $I_{mk}=30$  кА примерно в 3,9 раза). Это может приводить к аналогичному уменьшению (в 3,9 раза) и массогабаритных показателей указанной КПП, устанавливаемой на борт ЛА. Разумеется, что, несмотря на указанные преимущества использования в бортовых сетях ЛА частоты переменного тока  $f=400$  Гц и быстродействующих автоматов защиты от КЗ (например, для автоматов АЗ-250  $t_a=5$  мс), не так просто имеющиеся в авиационной и ракетно-космической технике разработки и схемно-технические решения в части тепловой защиты от КЗ сравнительно маломощных низковольтных бортовых сетей ЛА ( $f=400$  Гц) перенести на наземные мощные высоковольтные электрические сети промышленного электроснабжения ( $f=50$  Гц).

Из данных табл. 4 следует, что предельно допустимые амплитуды плотности  $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{il}$  тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ при времени его протекания (отключения)  $t_{kC}=5$  мс в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА ( $f=400$  Гц;  $T_a=3$  мс) для неизолированных проводов с медными и алюминиевыми жилами составляют примерно 2,48 кА/мм<sup>2</sup> и 1,40 кА/мм<sup>2</sup> соответственно, для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ и Р изоляцией – 1,85 (1,18) кА/мм<sup>2</sup>, а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 1,53 (0,99) кА/мм<sup>2</sup>. Причем, указанные численные значения предельно допустимых амплитуд плотности  $\delta_{ilm}$  тока КЗ в рассматриваемых проводниковых материалах токонесущих частей проводов (кабелей) бортовой сети ЛА не зависят от уровня амплитуды  $I_{mk}$  установившегося аварийного тока частотой  $f=400$  Гц в них.

Приведенные выше численные данные для  $\delta_{ilm}$  в КПП бортовой сети ЛА ( $f=400$  Гц) по сравнению с аналогичными численными значениями из [1] предельно допустимых амплитуд плотности  $\delta_{ilm}$  тока  $i_k(t)$  при КЗ, характерных для указанного случая ( $J_{ill} \neq 0$ ;  $t_{kC}=100$  мс;  $I_{mk}=30$  кА;  $T_a=20$  мс) и рассматриваемой КПП силовых цепей электрооборудования общепромышленного назначения ( $f=50$  Гц), оказываются примерно в 3,9 раза большими. Для оценки влияния длительности  $t_{kC}$  протекания КЗ в бортовой силовой цепи ЛА на выбор значений предельно допустимых сечений  $S_{il}$  исследуемых проводов и кабелей в табл. 5 приведены данные, соответствующие случаю  $t_{kC}=100$  мс.

Таблица 5

Значения предельно допустимых сечений  $S_{il}$  для проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА с амплитудой  $I_{mk}$  тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ от 3 до 30 кА ( $f=400$  Гц;  $J_{il} \neq 0$ ;  $t_{kC}=100$  мс;  $T_a=3$  мс)

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электрооборудования ЛА	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значение сечения $S_{il}$ , мм <sup>2</sup>			
		Амплитуда $I_{mk}$ установившегося тока КЗ, кА			
		3	5	10	30
Без изоляции	Медь	4,36	7,27	14,54	43,62
	Алюминий	7,73	12,89	25,77	77,32
ПВХ, Р	Медь	5,86	9,78	19,55	58,66
	Алюминий	9,19	15,32	30,65	91,95
ПЭТ	Медь	7,09	11,81	23,62	70,88
	Алюминий	10,97	18,29	36,58	109,75

Отметим, что количественные результаты для сечений  $S_{il}$  токонесущих частей КПП бортовой сети ЛА ( $f=400$  Гц), представленные в табл. 5, были получены по (1) с учетом данных табл. 2 и 3 для режима, когда в бортовых цепях электрооборудования ЛА с активно-индуктивной нагрузкой выполняется равенство  $T_a=3$  мс, а в качестве бортовых устройств защиты на ЛА от КЗ используются автоматы защиты типа АЗДЗ-200 ( $t_a=100$  мс) [13, 14]. Из данных табл. 5 вытекает, что при  $t_{kC}=100$  мс вне зависимости от численного значения токовой амплитуды  $I_{mk}$  предельно допустимые амплитуды плотности  $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{il}$  аварийного тока  $i_k(t)$  при КЗ для неизолированных проводов с медными и алюминиевыми жилами в бортовых цепях электрооборудования ЛА ( $T_a=3$  мс) составляют около 0,69 кА/мм<sup>2</sup> и 0,39 кА/мм<sup>2</sup> соответственно, для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ и Р изоляцией – 0,51 (0,33) кА/мм<sup>2</sup>, а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 0,42 (0,27) кА/мм<sup>2</sup>. Полученные результаты как для  $S_{il}$ , так и  $\delta_{ilm}$  ( $f=400$  Гц;  $t_{kC}=100$  мс) от соответствующих количественных данных для  $S_{il}$  и  $\delta_{ilm}$  ( $f=50$  Гц;  $t_{kC}=100$  мс) из [1] отличаются (из-за различных значений параметра  $T_a$ , который в первом случае численно составлял 3 мс, а во втором – 20 мс) практически не более, чем на 8 %. Отсюда можно заключить, что на выбор в бортовой сети ЛА предельно допустимых сечений  $S_{il}$  ее КПП и соответственно предельно допустимых амплитуд плотности  $\delta_{ilm}$  тока в токоведущих медных (алюминиевых) частях ее проводов и кабелей определяющее влияние оказывает не частота  $f$  переменного тока в бортовой сети ЛА, а длительность  $t_{kC}$  протекания в рассматриваемой электрической сети аварийного тока  $i_k(t)$  КЗ.

Учитывая вышеизложенное, для уменьшения в бортовых цепях электрооборудования ЛА предельно допустимых поперечных сечений  $S_{il}$  применяемых в них электрических проводов (кабелей) и соответственно обеспечения снижения для ЛА массогабаритных показателей их бортовой КПП необходимо в бортовых сетях ЛА наряду с использованием повышенной частоты  $f$  переменного тока (например,  $f=400$  Гц) применять быстродействующие автоматы защиты от КЗ, имеющие времена срабатывания  $t_a < 100$  мс.

**2.4. Расчетная оценка термической стойкости проводов и кабелей в бортовой сети ЛА.** Предлагаемый подход к расчетному выбору предельно допустимых поперечных сечений  $S_{il}$  рассматриваемых проводов (кабелей) в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА ( $f=400$  Гц) позволяет осуществить и расчетную оценку их термической стойкости. При этом, как и в [1, 8], термическую стойкость исследуемой КПП в бортовой сети ЛА предлагается определять по следующему теплофизическому условию:

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

где  $\theta_{iS}$ ,  $\theta_{iS}$  – соответственно текущая (конечная) и предельно допустимая кратковременная температуры нагрева токонесущих частей рассматриваемых электрических проводов и кабелей в бортовых цепях ЛА.

Для нахождения в (7) значений текущей или конечной температуры  $\theta_{iS}$  нагрева материала токонесущих частей КПП, определяемой джоулевым теплом от действия на него тока  $i_k(t)$  КЗ, первоначально используем известную нелинейную зависимость удельной электропроводности  $\gamma_i$  материала жилы (оболочки) провода и кабеля от величины температуры  $\theta_{iS}$  [1, 9]:

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

Важно отметить, что соотношение (8) в интервале температур от 20 °С до температуры плавления материалов жил (оболочек) КПП согласно экспериментальным данным из [9] аппроксимирует температурную зависимость величины  $\gamma_i$  для меди и алюминия с погрешностью не более 5 %. Заметим, что в (8) под величиной  $\gamma_{0i}$  понимается удельная электропроводность  $\gamma_i$  проводникового материала токонесущих частей КПП при температуре  $\theta_0=20$  °С. Тогда учитывая (8), решение неоднородного дифференциального уравнения первого порядка для конечной температуры  $\theta_{iS}$  джоулевого нагрева током  $i_k(t)$  однофазного КЗ материала жилы (оболочки) КПП в бортовой силовой цепи электрооборудования ЛА при начальном условии вида  $[\theta_{iS}(t=0) - \theta_{0i}] = 0$  может быть записано в следующем приближенном аналитическом виде [1, 12]:

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

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

Из (9) видно, что при принятых допущениях, известных численных значениях теплофизических характеристик  $\gamma_{0i}$ ,  $c_{0i}$  и  $\beta_{0i}$  для рассматриваемых проводниковых материалов токонесущих частей КПП в бортовой сети ЛА (см. данные табл. 1), 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  $i_k(t)$  однофазного КЗ определение искомой величины конечной температуры  $\theta_{iS}$  и ее сравнение по условию (7) с известной согласно [8] допустимой кратковременной температурой  $\theta_{iS}$  не вызывает ни каких электротехнических затруднений.

В качестве примера по расчетной оценке согласно условию (7) термической стойкости КПП бортовой сети ЛА ( $f=400$  Гц;  $J_{iI} \neq 0$ ;  $\theta_{0i} = \theta_{iI} = 65$  °С) рассмотрим

случай, когда для ее авиационного экранированного провода марки БПВЛЭ с ПВХ изоляцией и медной расщепленной жилой [7, 15] в аварийном режиме однофазного КЗ выполняются следующие исходные данные:  $I_{mk}=5$  кА;  $t_{kc}=5$  мс;  $T_a=3$  мс. Согласно данным табл. 4 для указанных исходных параметров предельно допустимое поперечное сечение  $S_{il}$  рассматриваемого провода численно составляет примерно  $2,71$  мм<sup>2</sup>. В этом случае величина интеграла действия  $J_{ak}$  тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА по (6) будет численно составлять около  $9,86 \cdot 10^4$  А<sup>2</sup>·с (см. табл. 3). Тогда по (9) с учетом данных табл. 1 конечная температура  $\theta_{is}$  джоулевого нагрева аварийным током  $i_k(t)$  КЗ вида (4) рассматриваемого медного провода, установленного в бортовой сети ЛА, окажется численно равной около  $133,8$  °С. Видно, что полученное расчетное значение конечной температуры  $\theta_{is}=133,8$  °С меньше предельно допустимой кратковременной температуры  $\theta_{is}$  нагрева проверяемого на термическую стойкость авиационного медного провода марки БПВЛЭ с ПВХ изоляцией, составляющей  $150$  °С [8]. Поэтому можно заключить, что условие (7) для этого расчетного случая применительно к бортовой сети ЛА выполняется.

В этой связи можно говорить о том, что выполненная по (7) расчетная оценка термической стойкости авиационного провода марки БПВЛЭ с медной жилой и ПВХ изоляцией силовых цепей электрооборудования ЛА с переменным током частотой  $f=400$  Гц указывает на работоспособность предложенного электротехнического подхода к расчетному выбору предельно допустимых сечений  $S_{il}$  токонесущих частей КПП, применяемой в бортовых сетях различных ЛА.

**3. Влияние частоты тока в бортовой сети ЛА на время срабатывания устройства ее защиты от КЗ.** Этот малоизученный на сегодня в области прикладной электротехники вопрос рассмотрим на примере возможного применения в бортовой сети ЛА защитного устройства (предохранителя) от КЗ, использующего не расплавляющуюся из-за джоулевого нагрева током КЗ металлическую плоскую пластину (как в обычном плавком электрическом предохранителе [11, 16]), а электрически взрывающуюся металлическую круглую проволоку [9, 12]. Известно, что время срабатывания  $t_a$  обычных плавких электрических предохранителей (например, одних из лучших в мире серии Ultra Quick на амплитуды тока промышленной частоты  $f=50$  Гц до  $1,4$  кА [17]) составляет не менее  $10$  мс. Уменьшить эти значения времени  $t_a$  срабатывания устройства защиты до единиц миллисекунд или долей единицы миллисекунды возможно за счет применения в исследуемой бортовой сети ЛА быстродействующих предохранителей (БП), использующих явление ЭВ металлической проволоки под действием аварийного тока КЗ частотой  $f=400$  Гц с амплитудой  $I_{mk}$  в единицы (десятки) килоампер [9, 18].

Воспользуемся известным аналитическим соотношением, определяющим время ЭВ  $t_e$  в атмосферном воздухе (время срабатывания  $t_a$  БП) круглой металлической проволоки сечением  $S_i$  при протекании через нее аварийного тока  $i_k(t)$  КЗ в бортовой сети ЛА [18]:

$$t_e = 1,333 \cdot \left[ J_c S_i^2 / (2\pi^2 f^2 k_s^2 I_{mk}^2) \right]^{1/3}, \quad (10)$$

где  $J_c$  – критическое значение интеграла тока для проводящего материала электрически взрывающейся металлической проволоки (для меди –  $J_c=1,95 \cdot 10^{17}$  А<sup>2</sup>·с·м<sup>-4</sup> [9]; для алюминия –  $J_c=1,09 \cdot 10^{17}$  А<sup>2</sup>·с·м<sup>-4</sup> [9]).

Из (10) при  $f=400$  Гц,  $k_s=1,66$  ( $T_a=3$  мс) и  $I_{mk}=30$  кА для круглой медной проволоки ( $J_c=1,95 \cdot 10^{17}$  А<sup>2</sup>·с·м<sup>-4</sup>) радиусом  $r_i=1$  мм ( $S_i=3,141$  мм<sup>2</sup>) величина времени срабатывания  $t_a$  рассматриваемого БП (времени воздушного ЭВ  $t_e$  этой проволоки) от воздействия на него (этот тип предохранителя) переменного тока  $i_k(t)$  КЗ в бортовой сети ЛА составляет примерно  $0,84$  мс. Как видим, ЭВ указанной проволоки, составляющей основу рассматриваемого БП, происходит на фронте первой полуволны аварийного тока  $i_k(t)$  (максимум этой полуволны при  $f=400$  Гц соответствует времени  $t_m=1,25$  мс), протекающего при однофазном КЗ в исследуемой бортовой сети ЛА. Отметим, что для  $I_{mk}=20$  кА при прежних указанных выше исходных данных время срабатывания  $t_a$  БП (время ЭВ  $t_e$  принятой круглой медной проволоки сечением  $S_i=3,141$  мм<sup>2</sup>) оказывается равным около  $1,09$  мс. Из (10) следует, что время ЭВ  $t_e$  металлической проволоки в бортовой сети ЛА с переменным током частотой  $f$  обратно пропорционально величине  $(f)^{2/3}$ . Чем выше частота  $f$  переменного тока в бортовой сети ЛА, тем будет меньше время срабатывания  $t_a$  указанного БП. Переход в бортовой сети ЛА с частоты  $f=50$  Гц переменного тока на его частоту  $f=400$  Гц приводит к уменьшению времени срабатывания  $t_a$  БП, использующего ЭВ металлической проволоки, в четыре раза.

Учитывая выявленную особенность влияния величины частоты  $f$  на время срабатывания  $t_a$  рассматриваемого БП, применение повышенной частоты переменного тока (например,  $f=400$  Гц) в бортовой сети ЛА с позиции возможности повышения быстродействия устройства ее защиты от КЗ, работа которого основывается на явлении ЭВ металлической проволоки, является технически оправданным предложением.

#### Выводы.

1. Предложенный инженерный электротехнический подход позволяет по условию термической стойкости КПП бортовых силовых цепей электрооборудования ЛА с переменным током повышенной частоты  $f=400$  Гц осуществлять расчетный выбор предельно допустимых поперечных сечений  $S_{il}$  неизолированных проводов, изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, токонесущие части которых в аварийном режиме их работы могут испытывать воздействие тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в бортовой сети ЛА с прогнозируемыми и подтвержденными многолетним опытом эксплуатации различных ЛА амплитудно-временными параметрами.

2. Установлено, что в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА ( $f=400$  Гц;  $T_a=3$  мс) предельно допустимые амплитуды плотности  $\delta_{lim} \approx I_{mk}/S_{il}$  тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ при времени его отключения  $t_{kc}=5$  мс в бортовой электрической сети ЛА вне зависимости от численного значения амплитуды  $I_{mk}$  установившегося тока КЗ для неизолированных проводов с медными (алюминиевыми) жилами составляют соответственно около  $2,48$  ( $1,40$ ) кА/мм<sup>2</sup>, для про-

водов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПВХ (Р) изоляцией – 1,85 (1,18) кА/мм<sup>2</sup>, а для проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 1,53 (0,99) кА/мм<sup>2</sup>. При увеличении в бортовой электрической сети ЛА времени отключения  $t_{кС}$  тока  $i_k(t)$  однофазного КЗ в указанных силовых цепях ЛА ( $T_a=3$  мс) предельно допустимые амплитуды плотности  $\delta_{ilm}$  аварийного тока КЗ уменьшаются и при  $t_{кС}=100$  мс для неизолированных проводов с медными (алюминиевыми) жилами составляют соответственно примерно 0,69 (0,39) кА/мм<sup>2</sup>, для проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПВХ (Р) изоляцией – 0,51 (0,33) кА/мм<sup>2</sup>, а для проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 0,42 (0,27) кА/мм<sup>2</sup>.

3. Определяющее влияние на выбор в бортовой сети ЛА предельно допустимых сечений  $S_{il}$  ее КПП и соответственно предельно допустимых амплитуд плотности  $\delta_{ilm}$  тока в токоведущих медных (алюминиевых) частях ее проводов и кабелей оказывает не частота  $f$  переменного тока в бортовой сети ЛА, а длительность  $t_{кС}$  протекания (время отключения) в бортовой электрической сети аварийного тока  $i_k(t)$  КЗ.

4. Для уменьшения в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА предельно допустимых сечений  $S_{il}$  применяемых в них не- и изолированных электрических проводов (кабелей) и соответственно обеспечения снижения для различных ЛА массогабаритных показателей их бортовой КПП необходимо в бортовых сетях ЛА наряду с использованием повышенной частоты  $f=400$  Гц переменного тока применять быстродействующие устройства (автоматы) защиты от КЗ с временем их срабатывания  $t_{а} \ll 100$  мс.

5. Показано, что применение повышенной частоты  $f=400$  Гц переменного тока в бортовых сетях ЛА по сравнению с его частотой  $f=50$  Гц приводит к значительному повышению (в четыре раза) быстродействия устройств (предохранителей) их защиты от КЗ, работа которых базируется на воздушном ЭВ круглой металлической (в частности, медной) проволоки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Уточненный выбор допустимых сечений электрических проводов и кабелей в силовых цепях промышленного электрооборудования с учетом аварийных режимов работы. – 2019.– № 3. – С. 37-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.06.
2. Баранов М.И. Выбор критических сечений электрических проводов и кабелей в силовых цепях электрооборудования промышленной электроэнергетики // Электротехника і електромеханіка. – 2019.– № 5.– С. 35-39. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.06.
3. Справочник по проектированию электрических сетей и оборудования / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
4. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Высшая школа, 1972. – 432 с.
5. <https://docplayer.ru/27377176-Lekciya-2-1-razdel-2-bortovaya-elektricheskaya-set-vozdushnogo-sudna-tema-2-1-elektricheskaya-provodka.html>.
6. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бортовая\\_система\\_электроснабжения\\_летательных\\_аппаратов](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бортовая_система_электроснабжения_летательных_аппаратов).

7. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
8. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, Кн. 1 / Под общей ред. И.Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
9. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
10. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 48: Авиаконструктор Андрей Туполев и его свершения в самолетостроении // Электротехника і електромеханіка. – 2019. – №2. – С. 3-8. doi: 10.20998/2074-272X.2019.2.01.
11. Системы электроснабжения летательных аппаратов (Учебник) / Под ред. С.П. Халютин. – М.: ВВИА имени Н.Е. Жуковского, 2010. – 428 с.
12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.
13. Отраслевой стандарт ОСТ 1 00195-76. Аппараты защиты бортовых электрических сетей самолетов и вертолетов. Методика выбора и проверки правильности установки в системах электроснабжения. – М.: Госстандарт СССР, 1976. – 167 с.
14. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293834/4293834330.htm>.
15. Власов Г.Д. Проектирование систем электроснабжения летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1967. – 415 с.
16. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический\\_предохранитель](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический_предохранитель).
17. <https://www.compel.ru/lib/na/2014/3/2-klassika-navsegda-sovremennyye-plavkie-predohraniteli-i-derzhatelyi-razediniteli>.
18. Баранов М.И., Лысенко В.О. Основные характеристики электрического взрыва металлического проводника при больших импульсных токах // Электричество. – 2013. – №4. – С. 24-30.

#### REFERENCES

1. 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.
2. Baranov M.I. A choice of critical sections of electric wires and cables in power circuits of electrical equipment of power industry. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no. 5, pp. 35-39. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.06.
3. Barybin Yu.G. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey i oborudovaniya* [Handbook per planning electrical circuit and equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 464 p. (Rus).
4. Knyazevskiy B.A., Lipkin B.Yu. *Elekrosnabzhenie promyshlennyykh predpriyatij* [Electric supply industrial organization]. Moscow, High school Publ., 1972. 432 p. (Rus).
5. Available at: <https://docplayer.ru/27377176-Lekciya-2-1-razdel-2-bortovaya-elektricheskaya-set-vozdushnogo-sudna-tema-2-1-elektricheskaya-provodka.html> (accessed 23 May 2019). (Rus).
6. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бортовая\\_система\\_электроснабжения\\_летательных\\_аппаратов](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бортовая_система_электроснабжения_летательных_аппаратов) (accessed 11 May 2019). (Rus).
7. 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).
8. 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).

9. Knopf'el' G. *Sverkhshil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
10. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 48: Aircraft designer Andrey Tupolev and his accomplishments in airplane design. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.2, pp. 3-8. doi: **10.20998/2074-272X.2019.2.01**.
11. Khalyutin S.P. *Sistemy elektrosnabzheniya letatel'nyh apparatov* [Systems of electric supply of aircrafts]. Moscow, AFEA to the name of N.E. Zhukovskogo Publ., 2010. 428 p. (Rus).
12. Baranov M.I. *Izbrannye 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).
13. *Otraslevoy standart OST 1 00195-76. Apparaty zashchity bortovykh elektricheskikh setey samoletov i vertoletov. Metodika vybora i proverki pravil'nosti ustanovki v sistemah elektrosnabzheniya* [Industry standard OST 1 00195-76. Vehicles of protection of side electric networks of airplanes and helicopters. Is there a method of choice and verification of rightness of setting in the systems of electric supply]. Moscow, National Standard of the USSR Publ., 1976. 167 p. (Rus).
14. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293834/4293834330.htm> (accessed 10 June 2019). (Rus).
15. Vlasov G.D. *Proektirovanie sistem elektrosnabzheniya letatel'nyh apparatov* [Planning of the systems of electric supply of aircrafts]. Moscow, Engineer Publ., 1967. 415 p. (Rus).
16. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fuse\\_\(electrical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fuse_(electrical)) (accessed 10 June 2019).
17. Available at: <https://www.compel.ru/lib/na/2014/3/2-klklassika-navsegda-sovremennyye-plavkie-predohraniteli-i-derzhateli-razediniteli> (accessed 20 July 2019). (Rus).
18. Baranov M.I., Lysenko V.O. The main characteristics of an electric explosion of a metallic conductor at high impulse currents. *Electricity*, 2013, no.4, pp.24-30. (Rus).

Поступила (received) 29.05.2019

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., з.л.н.с.,  
НИПКИ «Молния»  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
тел/phone +380 57 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 acceptable sections of electric wires and cables in on-board circuits of aircraft electrical equipment.**

**Purpose.** Implementation of choice of maximum permissible sections  $S_{ii}$  of the uninsulated wires and insulated wires (cables) with copper (aluminum) cores (shells) in the on-board power circuits of electrical equipment of different aircrafts with AC

current of frequency  $f > 50$  Hz. **Methodology.** Theoretical bases of the electrical engineering, electrophysics bases of technique of high voltage and high pulsed currents, applied thermal physics. **Results.** The engineering approach is developed for a calculation choice on the condition of thermal resistibility of aircraft cable-conductor products (CCP) of maximum permissible sections  $S_{ii}$  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 operation of on-board aircraft network with AC frequency of  $f > 50$  Hz flows of  $i_k(t)$  current at single phase short circuit (SC) with given amplitude-temporal parameters. It is determined that in the on-board power circuits of electrical equipment of aircrafts ( $f=400$  Hz; for permanent time of slump of  $T_a=3$  ms of aperiodic constituent of current of SC) maximum permissible amplitudes of current density of  $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{ii}$  of single phase SC at time of its disconnecting  $t_{kc}=5$  ms in the on-board network of aircraft without dependence on the numerical value of amplitude  $I_{mk}$  of the given current of SC for the uninsulated wires with copper (aluminum) cores is accordingly about 2.48 (1.40) kA/mm<sup>2</sup>, for wires (cables) with copper (aluminum) cores (shells) and PVC (R) with insulation – 1.85 (1.18) kA/mm<sup>2</sup>, and for wires (cables) with copper (aluminum) cores (shells) and PET insulation – 1.53 (0.99) kA/mm<sup>2</sup>. The influence on a choice in the on-board network of aircrafts of maximum permissible sections  $S_{ii}$  of its CCP and accordingly maximum permissible amplitudes of current density  $\delta_{ilm}$  of current copper (aluminum) parts of its wires and cables of frequency  $f$  of AC in the on-board network of aircraft is determined, but duration of flow  $t_{kc}$  (time of disconnecting) renders in the on-board network of aircrafts of emergency current of SC  $i_k(t)$ . For diminishing in the on-board power circuits of electrical equipment of aircrafts of maximum permissible sections  $S_{ii}$  of the electric wires (cables) applied in them and accordingly providing of decline for different aircrafts of mass and overall indicators of their on-board CCP is needed in the on-board networks of aircrafts along with the use of enhance frequency of  $f=400$  Hz of AC to apply the fast-acting devices of their protecting from SC in course of time wearing-outs of  $t_a \ll 100$  ms. It is shown that application of enhance frequency of  $f=400$  Hz of AC in the on-board networks of aircrafts as compared to its frequency of  $f=50$  Hz results in the considerable increase (in four times) of fast-acting of devices of their protection from SC, operation of which is based on the air electric explosion of metallic wire. **Originality.** First for the on-board network of aircrafts with AC of frequency of  $f=400$  Hz the maximum permissible sections  $S_{ii}$  and amplitudes of current density  $\delta_{ilm}$  of SC are determined for the uninsulated wires and insulated wires (cables) with copper (aluminum) cores (shells), PVC, R and PET insulation. **Practical value.** The obtained results will be used in the increase of thermal resistibility of CCP with copper (aluminum) cores (shells), PVC, R and PET insulation applied in the on-board electric networks of different aircrafts. References 18, tables 5.

**Key words:** aircraft, on-board power circuits of electrical equipment, electric wires and cables, frequency of alternating current, selection of maximum permissible cross-sections of cable products.