

УДК 621.3.022:537.311.8:316

**М.И. БАРАНОВ**

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИНДУКТИРОВАННОГО МОЩНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХОЙ НАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА ТОКА

Приведены результаты расчетной оценки электротермической стойкости проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами, поливинилхлоридной (ПВХ) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией первичных (вторичных) электрических цепей объектов электроэнергетики к воздействию на них аperiodического импульса тока временной формы 5/50 нс с амплитудой (1-100) кА, протекание которого вызвано внешней мощной электромагнитной помехой искусственного происхождения с заданными амплитудно-временными параметрами (АВП). Определены максимальные численные значения предельно допустимых и критических плотностей указанного помехового наносекундного импульса тока с принятыми АВП в рассматриваемых проводах (кабелях) без твердой изоляции, с ПВХ и ПЭТ изоляцией электрических цепей энергообъектов.

**Ключевые слова:** внешняя мощная электромагнитная помеха; провода и кабели электрических цепей объектов электроэнергетики; электротермическая стойкость кабельно-проводниковой продукции первичных и вторичных электрических цепей энергообъектов; предельно допустимые и критические плотности импульса тока аperiodической временной формы 5/50 нс в проводах и кабелях электроцепей энергообъектов.

**Введение.** Материалы статей израильского ученого Ph.D. V.I. Gurevich, недавно опубликованных в [1,2], указывают на то, что, несмотря на прошедшие десятилетия с начала во второй половине 20-го столетия активных научно-исследовательских работ в ведущих странах мира по проблеме защиты радиоэлектронного, электротехнического и электроэнергетического оборудования от действия на его электрические цепи мощного электромагнитного импульса (ЭМИ) ядерного взрыва (ЯВ), для большинства высокоразвитых стран мира обозначенная выше проблема так и осталась до конца не решенной. По смелому утверждению автора работ [1, 2] к настоящему времени «*ни в одной стране мира не были предприняты никакие практические меры для защиты национальных инфраструктур от ЭМИ ЯВ*». Выходит, что такая важная для современного общества инфраструктура и отрасль как промышленная электроэнергетика осталась не защищенной от поражающего действия на ее системы и устройства высокочастотного ЭМИ ЯВ. По мнению Ph.D. V.I. Gurevich многолетние действия ученых и специалистов в этом направлении были ограничены лишь материалами многочисленных докладов, отчетов и технических предложений. Не вдаваясь в причины такой сложившейся ситуации, а также в различные аспекты этой сложной научно-технической проблемы [1,2], отметим, что для специалистов из области техники и электрофизики высоких напряжений и больших импульсных токов здесь, на мой взгляд, применительно к защите объектов электроэнергетики от поражающего действия на них мощных электромагнитных помех (МЭМП) искусственного происхождения следует выделить два возможных для нас направления работ:

- защита от внешнего воздействия ЭМИ ЯВ микроэлектронной техники, установленной в устройствах и системах электроэнергетических объектов (ЭЭО);

- защита от внешнего воздействия ЭМИ ЯВ кабельно-проводниковой продукции, установленной в первичных и вторичных электрических цепях ЭЭО.

Постараемся в дальнейшем в меру своих научно-технических возможностей рассмотреть только отдельные вопросы возможной защиты от ЭМИ ЯВ электрических проводов и кабелей, используемых как в первичных, так и вторичных цепях рассматриваемых ЭЭО.

**1. Постановка задачи исследования электротермической стойкости проводов (кабелей) ЭЭО к импульсу тока 5/50 нс.** В рамках данного исследования рассмотрим провода и кабели электрических цепей ЭЭО, по круглым сплошным (расщепленным) медным (алюминиевым) жилам ( $i = 1$ ) и оболочкам (экранам,  $i = 2$ ) которых в продольном направлении протекает импульс тока  $i_L(t)$ , описываемый аperiodической временной формой  $\tau_f/\tau_p = 5/50$  нс с амплитудой  $I_{mL} = (1-100)$  кА. Отметим, что в этом случае временные параметры  $\tau_f$  и  $\tau_p$  соответствуют длительности фронта на уровне  $(0,1-0,9) \cdot I_{mL}$  и импульса на уровне  $0,5 \cdot I_{mL}$  указанного тока. Принятая временная форма наносекундного импульса тока  $i_L(t)$  соответствует требованиям, приведенным в [1-3] для действия МЭМП на ЭЭО. Примем, что исследуемые провода и кабели ЭЭО, находящиеся как в режиме длительно допустимой токовой загрузки, так и без нее (в режиме обесточивания), размещены в воздушной среде с температурой  $\theta_0 = 20$  °С. Используем условие адиабатического характера протекающих в материалах жил (оболочек) проводов (кабелей) электротепловых процессов, при котором влиянием теплоотдачи с поверхностей их токонесущих частей, имеющих текущую температуру  $\theta_i \geq \theta_0$ , и теплопроводности их проводящих материалов и изоляции на джоулев нагрев токонесущих частей жил (экранов) пренебрегаем. Расчетная оценка минимальной глубины проникновения  $\Delta_i$  в медную (алюминиевую) жилу (оболочку) провода (кабеля) используемого токового импульса ( $t_m \approx 1,6$  нс  $\tau_f \approx 8$  нс) показывает, что в стационарном режиме значение ее величины  $\Delta_i \approx 2[t_m/(\pi\mu_i\gamma_i)]^{1/2}$  [4], где  $t_m$  – время, соответствующее амплитуде тока  $I_{mL}$ ,  $\mu_i = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная, а  $\gamma_i$  – удельная электропроводность меди (алюминия) жилы (экрана) при

$\theta_0 = 20$  °С, составляет для области высоких частот в спектре импульса тока в медь примерно 1,2 мкм, а в алюминий – 1,5 мкм. С учетом того, что основное тепловыделение в материалах жил (экранов) исследуемых проводов (кабелей) происходит на спаде рассматриваемого импульса тока (при  $t \geq 100 \cdot t_m$  для области низких частот в спектре импульса тока), то максимальная глубина проникновения  $\Delta_i$  магнитного поля по приведенной выше формуле для меди будет составлять не менее 12 мкм, а для алюминия – 15 мкм.

Несмотря на приведенные выше численные оценки глубин проникновения  $\Delta_i$  магнитного поля исследуемого апериодического наносекундного импульса тока в токонесущие части провода (кабеля), в первом (грубом) приближении на основании того, что при полной длительности воздействия на них принятого токового импульса (внутреннего источника тепла)  $t_0 \approx 10\tau_p \approx 500$  нс в рассматриваемых токопроводящих материалах кабельно-проводниковой продукции (КПП) длина радиальной тепловой волны будет составлять примерно  $\lambda_T \approx 0,05$  мм [4] полагаем, что диссипация (рассеяние) джоулева тепла в медных (алюминиевых) жилах и оболочках КПП будет происходить практически по их всему поперечному сечению. Считаем, что электротермическая стойкость проводов (кабелей) электрических цепей ЭЭО при воздействии на них указанного импульса тока лимитируется их предельно допустимой кратковременной температурой нагрева  $\theta_{ik}$ , зависящей от степени снижения механической прочности материала жилы (оболочки) и тепловых условий работы изоляции проводов (кабелей) в режиме ее кратковременного нагрева наносекундным импульсом тока, протекающим по их токонесущим частям. Принимаем, что в первом приближении значение температуры  $\theta_{ik}$  соответствует предельно допустимой кратковременной температуре нагрева  $\theta_{ikd}$  проводов и кабелей токами короткого замыкания промышленной частоты 50 Гц, приведенной в [5,6]. Поэтому для изолированных проводов (кабелей) с медными и алюминиевыми жилами (экранами) и ПВХ изоляцией можно считать, что  $\theta_{ik} \approx 150$  °С, а для проводов и кабелей с ПЭТ изоляцией –  $\theta_{ik} \approx 120$  °С [5,6]. Для неизолированных (оголенных) проводов согласно [5,6] при тяжениях в их токонесущих частях не более 10 Н/мм<sup>2</sup> для медной жилы  $\theta_{ik} \approx 300$  °С, а для алюминиевой жилы –  $\theta_{ik} \approx 200$  °С. Требуется выполнить приближенную расчетную оценку электротермической стойкости исследуемой КПП к воздействию наносекундного импульса тока апериодической временной формы  $\tau_f/\tau_p = 5/50$  нс, а также определить предельно допустимые  $S_{id}$  и критические  $S_{ik}$  поперечные сечения жил (экранов) рассматриваемых проводов (кабелей) и максимальные значения предельно допустимых  $\delta_{mid}$  и критических  $\delta_{mik}$  плотности импульсного тока от МЭМП в токонесущих частях рассматриваемой КПП как без изоляции (случай оголенных проводов), так и с ПЭТ и ПВХ изоляцией. Для большей ясности отметим, что при этом сечения  $S_{id}$  и плотности тока  $\delta_{mid}$  будут соответствовать указанным предельно допустимым кратковременным температурам нагрева  $\theta_{ik}$  исследуемых

проводов (кабелей), а сечения  $S_{ik}$  и плотности тока  $\delta_{mik}$  – явлению электрического взрыва (ЭВ) материала их токонесущих частей и выходу из строя соответствующих электрических цепей ЭЭО.

**2. Расчетная оценка электротермической стойкости проводов (кабелей) ЭЭО к воздействию импульса тока 5/50 нс.** Воспользуемся известным критериальным соотношением, определяющим электротермическую стойкость рассматриваемых неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) ЭЭО к действию на их медные или алюминиевые жилы (экраны) нормированного по [1-3] апериодического импульса тока 5/50 нс и имеющим следующий вид [5]:

$$\theta_i \leq \theta_{ik}. \quad (1)$$

Для оценки в (1) текущей температуры нагрева  $\theta_i$  материалов жил (экранов) проводов и кабелей поперечным сечением  $S_i$  электрических цепей ЭЭО, с учетом нелинейного характера изменения по [7] из-за нагрева их удельной электропроводности  $\gamma_i = \gamma_{0i} [1 + c_{0i} \beta_{0i} (\theta_i - \theta_0)]^{-1}$ , в случае протекания по ним исследуемого апериодического импульса тока и соответственно определения по (1) их стойкости при известных нам исходных величинах  $\theta_{ik}$  воспользуемся следующим соотношением [5]:

$$\theta_i \approx \theta_{0i} + (c_{0i} \beta_{0i})^{-1} \left\{ \exp[J_L \beta_{0i} / (\gamma_{0i} S_i^2)] - 1 \right\}, \quad (2)$$

где  $\gamma_{0i}$ ,  $c_{0i}$ ,  $\beta_{0i}$  – соответственно удельная электропроводность, удельная теплоемкость, отнесенная к единице объема материалов жил (оболочек) проводов (кабелей), и тепловой коэффициент удельной электропроводности материалов токонесущих частей КПП до воздействия на них наносекундного импульса тока

при температуре воздушной среды  $\theta_0$ ;  $J_L = \int_0^{\tau_p} i_L^2(t) dt$  –

интеграл действия апериодического импульса тока  $\tau_f/\tau_p = 5/50$  нс, протекающего в аварийном режиме (при воздействии ЭМИ ЯВ на инженерные коммуникации воздушных и подземных линий электропередачи) по жилам (оболочкам) исследуемых проводов и кабелей;  $\theta_{0i} = \theta_0$  или  $\theta_{0i} = \theta_{id}$ .

Из (2) следует, что при заданных значениях  $S_i$ ,  $\theta_0$  и неизменных величинах  $\gamma_{0i}$ ,  $c_{0i}$  и  $\beta_{0i}$  нахождение по (2) температуры нагрева  $\theta_i$  жилы (оболочки) провода или кабеля протекающим помеховым наносекундным током  $i_L(t)$  будет сводиться к определению интеграла действия  $J_L$  данного токового импульса. Расчетную оценку интеграла действия  $J_L$  воздействующего на токонесущие части провода (кабеля) апериодического импульса тока  $\tau_f/\tau_p = 5/50$  нс предлагается осуществлять по следующему приближенному аналитическому выражению [5]:

$$J_L \approx k_L^2 I_{mL}^2 [0,14t_m + 0,66\tau_p + t_m\tau_p(1,52t_m + 7,4\tau_p)^{-1}], \quad (3)$$

где

$$k_L \approx \left[ (0,21 \cdot t_m \tau_p^{-1})^{\frac{0,76t_m}{(3,7\tau_p - 0,76t_m)}} - (0,21 \cdot t_m \tau_p^{-1})^{\frac{3,7\tau_p}{(3,7\tau_p - 0,76t_m)}} \right]^{-1}$$

– нормирующий коэффициент для помехового импульса

тока 5/50 нс, обусловленного воздействием на электрические цепи ЭЭО мощного ЭМИ высотного ЯВ.

В табл. 1 приведены численные значения теплофизических параметров  $\gamma_{0i}$ ,  $c_{0i}$  и  $\beta_{0i}$  при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  для меди и алюминия, широко применяемых в проводах (кабелях) первичных и вторичных электрических цепей ЭЭО [5].

Таблица 1 – Теплофизические характеристики основных проводящих материалов жил (оболочек) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  [4,7]

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

**3. Расчетная оценка предельно допустимых и критических сечений жил (оболочек) проводов (кабелей) ЭЭО для импульса тока 5/50 нс.** Для предельно допустимых поперечных сечений  $S_{id}$  токонесящих жил (оболочек) рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО с учетом критерия соотношения (1) для их электротермической стойкости к действию импульса тока 5/50 нс от МЭМП имеем [5]:

$$S_{id} \approx \sqrt{J_L} / C_{id}, \quad (4)$$

где  $C_{id} = (J_{ikd} - J_{id})^{1/2}$ ;  $J_{ikd}$  и  $J_{id}$  – соответственно интегралы импульса тока 5/50 нс согласно [7] для токонесящих жил (экранов) проводов и кабелей ЭЭО, предельные кратковременные и длительно допустимые температуры нагрева материала которых соответствуют известным величинам  $\theta_{ik}$  и  $\theta_{id}$ .

Численные значения для температуры  $\theta_{ik}$  нами были приведены ранее в разд. 1. Что касается температуры  $\theta_{id}$ , то укажем, что для изолированных проводов (кабелей) исследуемых электрических цепей ЭЭО с ПЭТ и ПВХ изоляцией величина  $\theta_{id}$  численно составляет  $65^\circ\text{C}$ , а для неизолированных (оголенных) проводов –  $70^\circ\text{C}$  [6]. Для полноты информации заметим, что в режиме обесточивания проводов (кабелей) их текущая температура в принятом нами приближении составляет  $\theta_i = \theta_0$ , а в номинальном режиме их токовой загрузки –  $\theta_i = \theta_{id}$ . Поэтому при расчетной оценке в (4) интегралов импульса тока 5/50 нс  $J_{ikd}$  и  $J_{id}$  можно воспользоваться следующими приближенными соотношениями [5]:

$$J_{ikd} \approx \gamma_{0i} \cdot \beta_{0i}^{-1} \ln[c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{ik} - \theta_0) + 1]; \quad (5)$$

$$J_{id} \approx \gamma_{0i} \cdot \beta_{0i}^{-1} \ln[c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{id} - \theta_0) + 1]. \quad (6)$$

Для критических поперечных сечений  $S_{ik}$  токонесящих жил (оболочек) рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО при действии на них импульса тока 5/50 нс с учетом известного из [7] условия ЭВ металлического токопровода находим [5]:

$$S_{ik} \approx \sqrt{J_L} / D_{ik}, \quad (7)$$

где  $D_{ik} = (J_{ik} - J_{id})^{1/2}$ ;  $J_{ik}$  – критическое значение интеграла импульса тока 5/50 нс для токонесящих жил (оболочек) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО, при котором наступает их ЭВ и выход из строя.

Пользователю следует помнить, что при отсутствии в исследуемых проводах (кабелях) первичных (вторичных) электрических цепей ЭЭО предварительной токовой загрузки до воздействия на них ЭМИ ЯВ и соответственно рассматриваемого импульса тока 5/50 нс из (6) при  $\theta_i = \theta_0$  вытекает, что интеграл тока  $J_{id} = 0$ . Из (4) и (7) видно, что численные значения поперечных сечений  $S_{id}$  и  $S_{ik}$  для медных (алюминиевых) жил (оболочек) проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО, испытывающих поражающее воздействие мощного ЭМИ ЯВ и обусловленное им протекание по их токоведущим частям наносекундного импульса тока аperiodической временной формы  $\tau_f/\tau_p = 5/50$  нс, будут зависеть практически только от численного значения интеграла действия  $J_L$  этого токового импульса. В свою очередь, согласно (3) данное значение интеграла действия  $J_L$  при заданных нами временных параметрах  $\tau_f$ ,  $t_m$  и  $\tau_p$  (соответственно 5, 8 и 50 нс) будет определяться лишь амплитудой  $I_{mL}$  протекающего наносекундного импульса тока. Согласно [3] нормированный уровень электрического напряжения  $U_H$  наводки в первичных (вторичных) электрических цепях ЭЭО при воздействии на них с окружающей воздушной атмосферы МЭМП, вызванной мощным ЭМИ высотного ЯВ, составляет 2,5 кВ. Какие амплитудные значения  $I_{mL}$  тока аperiodической временной формы 5/50 нс могут вызвать такие перенапряжения в первичных (вторичных) цепях ЭЭО? Безусловно, эти уровни в каждом конкретном случае будут определяться значениями электрических сопротивлений соответствующих участков данных электрических цепей. Учитывая аperiodический характер рассматриваемой электрической наводки в цепях ЭЭО и низкоомный характер электрической нагрузки (доли Ом), содержащей высокопроводные жилы и оболочки КПП, можно говорить о том, что уровни импульсного тока наводки могут изменяться в широком пределе. Поэтому для количественных оценок по (3) значений интеграла действия  $J_L$  помехового наносекундного импульса тока 5/50 нс диапазон изменений его амплитуды  $I_{mL}$  в проводах (кабелях) цепей ЭЭО может составлять от 1 до 100 кА.

В табл. 2 приведены численные значения интегралов импульса тока 5/50 нс, найденные при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  по (5), (6) и экспериментальным путем при ЭВ в воздушной среде коротких металлических проволочек [7,8].

Таблица 2 – Численные значения интегралов импульса тока 5/50 нс  $J_{ikd}$ ,  $J_{id}$  и  $J_{ik}$  для исследуемых проводов (кабелей) электрических цепей ЭЭО при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  [7,8]

Вид изоляции провода (кабеля) в цепях ЭЭО	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля) в цепях ЭЭО	Значения интегралов импульса тока 5/50 нс в цепях ЭЭО, $10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$		
		$J_{ikd}$	$J_{id}$	$J_{ik}$
ПВХ	Медь	0,227	0,092	1,950
	Алюминий	0,095	0,039	1,090
ПЭТ	Медь	0,183	0,092	1,950
	Алюминий	0,077	0,039	1,090
Провод без изоляции	Медь	0,395	0,101	1,950
	Алюминий	0,120	0,043	1,090

**4. Расчетная оценка предельно допустимых и критических плотностей импульса тока 5/50 нс для жил (оболочек) проводов (кабелей) ЭЭО.** Для мак-



симальных значений предельно допустимых плотностей  $\delta_{mid}$  помехового импульса тока 5/50 нс в токонесущих жилах (оболочках) рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО из (4)-(6) с учетом принятых допущений в первом приближении находим [5]:

$$\delta_{mid} \approx I_{mL} / S_{id} \approx I_{mL} C_{id} / \sqrt{J_L} . \quad (8)$$

Для максимальных значений критических плотностей  $\delta_{mik}$  помехового импульса тока 5/50 нс в токоведущих частях рассматриваемых проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО из (6) и (7) при принятых допущениях в первом приближении получаем [5]:

$$\delta_{mik} \approx I_{mL} / S_{ik} \approx I_{mL} D_{ik} / \sqrt{J_L} . \quad (9)$$

Учитывая, что  $(J_L)^{1/2} \sim I_{mL}$ , из (8) и (9) следует, что в принятом нами приближении искомые значения предельно допустимых  $\delta_{mid}$  и критических  $\delta_{mik}$  плотностей импульса тока  $\tau_p/\tau_m = 5/50$  нс, вызванного воздействием на системы ЭЭО мощного ЭМИ ЯВ, в исследуемых проводах и кабелях первичных (вторичных) электрических цепей ЭЭО не будут зависеть от амплитуды  $I_{mL}$  тока.

**5. Результаты численной реализации предложенного подхода по оценке электротермической стойкости проводов (кабелей) ЭЭО к воздействию импульса тока 5/50 нс.** Используя представленные выше приближенные расчетные соотношения, выполним расчетную оценку предельно допустимых поперечных сечений  $S_{id}$ , критических поперечных сечений  $S_{ik}$ , предельно допустимых плотностей  $\delta_{mid}$  тока, критических плотностей  $\delta_{mik}$  тока, а также температуры нагрева  $\theta_i$  медных (алюминиевых) жил (оболочек) проводов и кабелей с ПВХ и ПЭТ изоляцией поперечным сечением  $S_i = S_{id}$  электрических цепей ЭЭО, испытывающих при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  в нормальном рабочем режиме ( $\theta_{id} = 65^\circ\text{C}$ ) воздействие помехового наносекундного импульса тока аperiodической временной формы 5/50 нс ( $t_m = 8$  нс;  $\tau_p = 50$  нс;  $k_L = 1,16$ ) с амплитудой  $I_{mL} = 25$  кА. Из (3)-(6) при принятых исходных данных для АВП помехового наносекундного импульса тока  $i_L(t)$  с учетом материалов табл. 1 и 2 находим, что для медных жил (экранов) указанных проводов и кабелей с ПВХ изоляцией предельно допустимое поперечное сечение  $S_{id}$  составляет примерно  $4,7 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>, а с ПЭТ изоляцией –  $5,7 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>. Для алюминиевых жил (оболочек) этих проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией численное значение  $S_{id}$  оказывается равным около  $7,3 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>, а с ПЭТ изоляцией –  $8,8 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>. Согласно (2) данным поперечным сечениям  $S_{id}$  будут соответствовать наибольшие температуры нагрева  $\theta_i$  исследуемых медных и алюминиевых жил (экранов) КПП с ПВХ и ПЭТ изоляцией, приближенно составляющие 133 и 109 °С. Так как эти температуры не превышают соответствующих предельно допустимых кратковременных температур нагрева  $\theta_{ik}$  для проводов и кабелей с ПВХ (150 °С) и ПЭТ (120 °С) изоляцией, то согласно (1) можно говорить о том, что данная КПП цепей ЭЭО удовлетворяет требованиям электротермической стойкости к воздействию на нее указанного помехового аperiodического импульса тока 5/50

нс амплитудой  $I_{mL} = 25$  кА. Далее из (7) с учетом (3), (6) и данных табл. 1 и 2 определяем, что в рассматриваемом случае ( $t_m = 8$  нс;  $\tau_p = 50$  нс;  $k_L = 1,16$ ;  $I_{mL} = 25$  кА;  $J_L = 29,6$  А<sup>2</sup>·с) критическое поперечное сечение  $S_{ik}$  для медных токонесущих частей проводов и кабелей электрических цепей ЭЭО с ПВХ и ПЭТ изоляцией будет составлять примерно  $1,3 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>, а для алюминиевых –  $1,7 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>.

Что касается неизолированных (оголенных) медных и алюминиевых токонесущих частей КПП электрических схем ЭЭО, то для них при их предварительной токовой нагрузке ( $\theta_{id} = 70^\circ\text{C}$ ) в рассматриваемом нештатном режиме работы, связанном с дополнительным воздействием на них помехового импульса тока 5/50 нс, в соответствии с (4)-(6) и данными табл. 1 и 2 предельно допустимые поперечные сечения  $S_{id}$  окажутся соответственно примерно равными  $3,2 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup> и  $6,2 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>. Следует обратить внимание инженеров-электронщиков на тот любопытный радиотехнический факт, что последние указанные численные значения параметра  $S_{id}$  по порядку величины соответствуют поперечным сечениям луженых медных токовых «дорожек» на большинстве электронных плат микропроцессорной техники. Критические поперечные сечения  $S_{ik}$  для оголенных медных и алюминиевых токопроводов цепей ЭЭО согласно (6), (7) и данных табл. 1 и 2 в этом случае (для заданного помехового импульса тока 5/50 нс) будут примерно равными  $1,25 \cdot 10^{-2}$  и  $1,65 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup>. Отсюда вытекает повышенная актуальность вопросов оценки и обеспечения электротермической стойкости к индуцированному внешней МЭМП искусственного происхождения (например, ЭМИ высотного ЯВ) наносекундному импульсу тока  $i_L(t)$  особенно для слаботочной КПП вторичных электрических цепей ЭЭО и тонких токопроводящих структур электронных плат микроэлектронной техники, широко используемой в устройствах ЭЭО.

В табл. 3 с использованием (3)-(9), данных табл. 1 и 2 приведены приближенные численные значения предельно допустимых  $\delta_{mid}$  и критических  $\delta_{mik}$  плотностей помехового наносекундного импульса тока 5/50 нс в медных и алюминиевых жилах (оболочках) КПП первичных и вторичных электрических цепей ЭЭО.

Таблица 3 – Численные значения предельно допустимых  $\delta_{mid}$  и критических  $\delta_{mik}$  плотностей импульса тока 5/50 нс в медных и алюминиевых жилах (экранах) КПП первичных и вторичных электрических цепей ЭЭО

Вид изоляции провода (кабеля) в цепях ЭЭО	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля) в цепях ЭЭО	Значения плотностей $\delta_{mid}$ и $\delta_{mik}$ для импульса тока 5/50 нс в цепях ЭЭО, кА/мм <sup>2</sup>	
		$\delta_{mid}$	$\delta_{mik}$
ПВХ	Медь	532	1923
	Алюминий	342	1470
ПЭТ	Медь	438	1923
	Алюминий	284	1470
Провод без изоляции	Медь	781	2000
	Алюминий	403	1515

Сравнение приведенных в табл. 3 численных результатов для предельно допустимых  $\delta_{mid}$  и критиче-

ских  $\delta_{mik}$  плотностей наносекундного импульса тока 5/50 нс в медных и алюминиевых токоведущих частях указанной КПП электрических цепей ЭЭО с известными по [9] значениями плотностей тока  $\delta_{mid}$  и  $\delta_{mik}$  применительно к протеканию в них наносекундного токового импульса 10/350 мкс от короткого грозового разряда в наружные (внутренние) элементы и устройства ЭЭО [10] показывает, что численные значения плотностей  $\delta_{mid}$  и  $\delta_{mik}$  для исследуемого наносекундного импульса тока соответственно примерно в 60 и 90 раз превышают соответствующие значения рассматриваемых токовых плотностей для указанного наносекундного импульса тока.

**Выводы.** 1. Впервые расчетным путем установлено, что для медных жил (оболочек) электрических проводов (кабелей) ЭЭО с ПВХ и ПЭТ изоляцией предельно допустимые плотности  $\delta_{mid}$  помехового импульса тока 5/50 нс, индуцированного в цепях ЭЭО внешней МЭМП искусственного происхождения, численно составляют примерно 532 и 438 кА/мм<sup>2</sup>, а для алюминиевых жил (оболочек) электрических проводов (кабелей) с ПВХ и ПЭТ изоляцией – соответственно 342 и 284 кА/мм<sup>2</sup>. Для неизолированных (оголенных) медных и алюминиевых токонесущих частей КПП предельно допустимые плотности  $\delta_{mid}$  указанного наносекундного импульса тока составляют около 781 и 403 кА/мм<sup>2</sup>.

2. Расчетные оценки критических плотностей  $\delta_{mik}$  помехового импульса тока 5/50 нс в медных жилах (оболочках) электрических проводов (кабелей) цепей ЭЭО с ПВХ и ПЭТ изоляцией указывают на то, что в первом приближении они численно составляют около 1923 кА/мм<sup>2</sup>, а в алюминиевых жилах (оболочках) электрических проводов (кабелей) с ПВХ и ПЭТ изоляцией – примерно 1470 кА/мм<sup>2</sup>. Для неизолированных (оголенных) медных и алюминиевых токонесущих частей КПП в условиях воздействия на них внешних МЭМП искусственного происхождения критические плотности  $\delta_{mik}$  исследуемого наносекундного импульса тока составляют примерно 2000 и 1515 кА/мм<sup>2</sup>.

3. Предложенный инженерный подход для расчетной оценки электротермической стойкости КПП первичных (вторичных) электрических цепей ЭЭО и полученные приближенные численные значения для предельно допустимых  $\delta_{mid}$  и критических  $\delta_{mik}$  плотностей помехового импульса тока 5/50 нс амплитудой  $I_{mL} = (1-100)$  кА могут быть использованы при выборе КПП для первичных и вторичных электрических цепей ЭЭО, отвечающих действующим жестким требованиям по помехоустойчивости их систем к поражающему воздействию на них внешних МЭМП искусственного происхождения, включая и мощный ЭМИ высотного ЯВ. Установленные в первом приближении количественные значения величин плотностей  $\delta_{mid}$  и  $\delta_{mik}$  рассматриваемого помехового наносекундного аperiodического импульса тока 5/50 нс могут найти также свое практическое применение и при проектировании (конструировании) стойких к воздействию внешних МЭМП токопроводящих «дорожек» электронных плат микропроцессорной техники, устанавливаемой во многих системах и устройствах объектов промышленной электроэнергетики.

кундного аperiodического импульса тока 5/50 нс могут найти также свое практическое применение и при проектировании (конструировании) стойких к воздействию внешних МЭМП токопроводящих «дорожек» электронных плат микропроцессорной техники, устанавливаемой во многих системах и устройствах объектов промышленной электроэнергетики.

**Список литературы:** 1. Gurevich V.I. Military and political aspects of one of the problems of the modern power industry / V.I. Gurevich // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №5. – С. 69–74. 2. Gurevich V.I. Problems in testing digital protective relay for immunity to intentional destructive electromagnetic impacts. Continuation of the theme / V.I. Gurevich // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №6. – С. 66–69. 3. Сухоруков С.А. Помехозащитные устройства ЗАО «ЭМСОТЕХ» / С.А. Сухоруков. – Калуга: ЭМСОТЕХ, 2014. – 72 с. 4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач / М.И. Баранов. – Х.: Точка, 2010. – 407 с. 5. Баранов М.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему действию импульсного тока молнии / М.И. Баранов, В.И. Кравченко // *Электричество*. – 2013. – № 10. – С. 7–13. 6. *Электротехнический справочник: Производство и распределение электрической энергии*. Том 3, Кн. 1 / Под ред. И.Н. Орлова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с. 7. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 391 с. 8. Баранов М.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей электроэнергетических объектов к поражающему действию большого импульсного тока молнии / М.И. Баранов, С.В. Рудаков // *Электричество*. – 2016. – № 3. – С. 12–22. 9. Баранов М.И. Применение мощного высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 мкс для оценки электротермической молниестойкости проводов и кабелей электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики / М.И. Баранов, С.В. Рудаков // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 7–12. 10. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. – Part 1: General principles». – Geneva, Publ. IEC, 2010.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gurevich V.I. Military and political aspects of one of the problems of the modern power industry. *Elektrotehnika i elektromehaniika*. 2015. № 5. pp. 69–74. 2. Gurevich V.I. Problems in testing digital protective relay for immunity to intentional destructive electromagnetic impacts. Continuation of the theme. *Elektrotehnika i elektromehaniika*. 2015. № 6. pp. 66–69. 3. Suhorukov S.A. Pomehozashchitnye ustrojstva ZAO «EMCOTEX». Kaluga: EMCOTEX, 2014. 72 p. 4. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. Vol. 2, Kniga. 2: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach. Kharkiv: Tochka, 2010. 407 s. 5. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Elektrottermicheskaja stojkost' provodov i kabelej letatel'nogo apparata k porazhushhemu dejstvuju impul'snogo toka molnii. *Elektrichestvo*. 2013. № 10. pp. 7–13. 6. *Elektrotehnicheskij spravocchnik: Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoj energii*. Vol. 3, Kniga 1. Pod red. I.N. Orlova. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 880 p. 7. Knopfel' H. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja. Moscow: Mir. 1972. 391 p. 8. Baranov M.I., Rudakov S.V. Elektrottermicheskaja stojkost' provodov i kabelej elektroenergeticheskikh ob'ektov k porazhushchemu dejstvuju bol'shogo impul'snogo toka molnii. *Elektrichestvo*. 2016. № 3. pp. 12–22. 9. Baranov M.I., Rudakov S.V. Primenenie moshchnogo vysokovol'tnogo generatora GITM-10/350  $\mu$ s dlja otsenki elektrottermicheskogo molniestojkosti provodov i kabelej elektricheskikh tsepej ob'ektov promyshlennoj elektroenergetiki. *Visnik NTU «HPI»*. Zbirnik naukovih prac'. Serija: "Tehnika ta elektrofizika visokih naprug". Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. № 51 (1160). pp. 7–12. 10. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva: Publ. IEC, 2010.

Поступила (received) 23.03.2016

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Баранов Михаил Иванович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» НТУ «ХПИ», г. Харьков; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

**Baranov Michail Ivanovich** – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Main Researcher Research & Design Institute «Molniya» of NTU «KhPI», Kharkov; tel.: (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.