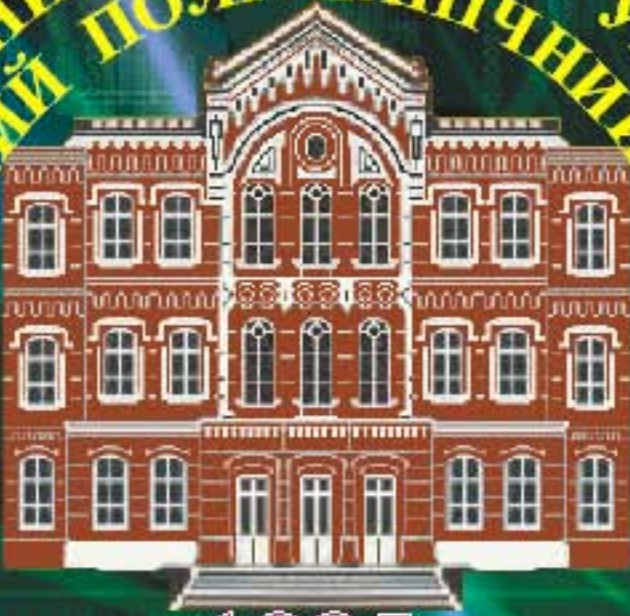


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



1885
«ХІІІ»

ISSN 2079-0740
51'2015

ВІСНИК

Національного технічного університету
«ХІІІ»

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Техніка та електрофізика високих напруг

№ 51 (1160) 2015

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р

Харків
НТУ «ХПІ», 2015

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 51 (1160). – 139 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

Координаційна рада:

Голова: Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

Секретар: К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц.;

А. П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

А. І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;

В. В. ЄПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;

П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;

В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.;

О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.;

П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.; В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.;

М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.;

Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. ТИМОФІЄВ, д-р техн. наук, проф.;

М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: Л. В. ВАВРІВ, канд. фіз.-мат наук, ст. наук. співр.

М. І. БАРАНОВ, д-р техн. наук, ст. наук. співр.; Н. І. БОЙКО, д-р техн. наук, доц.;

А. Г. ГУРІН, д-р техн. наук, проф.; Б. В. КЛИМЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

Г. М. КОЛІУШКО, канд. техн. наук, ст. наук. співр.; В. М. МИХАЙЛОВ, д-р техн. наук, проф.;

В. В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, ст. наук. співр.; О. А. СЕРКОВ, д-р техн. наук, проф.;

Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, проф.; В. В. РУДАКОВ, д-р техн. наук, проф.;

І. В. ЯКОВЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Техніка та електрофізика високих напруг», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 9 від 30 жовтня 2015 р.

УДК 537.529:544.344.15.4

В. Ю. БАКЛАРЬ, Н. И. КУСКОВА, Д. И. ЧЕЛПАНОВ**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОВЗРЫВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ**

Разработана математическая модель электровзрыва цилиндрических проводников, основанная на представлениях о волне испарения. Получены аналитические выражения для временных зависимостей сопротивления, тока, напряжения и давления от параметров электроустановки и характерных размеров проводника в процессе однородного нагрева цилиндрических проводников импульсным током. Экспериментально получены временные зависимости сопротивления, тока и напряжения. Проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: математическая модель, электрический взрыв проводников, согласованный режим электровзрыва, волна испарения.

Введение. Под электрическим взрывом проводников (ЭВП) обычно понимается разрушение проводников в результате воздействия комплекса сил и явлений, возникающих при протекании в проводнике мощного импульсного тока и сопровождающегося, как правило, импульсом электромагнитного излучения и ударными волнами [1].

Для описания этого явления используются система уравнений магнитной гидродинамики с учетом граничных условий, уравнение состояния материала проводника и уравнение электрической цепи, в которую включен проводник (задается чаще всего в виде последовательного RLC – контура) с существенно нелинейной нагрузкой (сопротивление проводника) [2].

Нагрев проводника мощным импульсом тока приводит к электрическому взрыву, в результате которого происходит нагрев и последовательный ряд фазовых превращений вещества (плавление, испарение). Возникновение повторного разряда в продуктах ЭВ вызывает образование плазменного канала и генерацию ударных волн. После прекращения тока происходит быстрое расширение парогазовой полости и конденсация продуктов ЭВ.

На начальной стадии ЭВ сопротивление твердого проводника быстро возрастает. Временные зависимости тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ могут быть получены экспериментально в виде осциллограмм, однако для прогнозирования результата воздействия мощного импульса тока на вещество необходимо получить аналитические временные зависимости сопротивления $R(t)$, тока $I(t)$, напряжения $U(t)$ и генерируемого импульсного давления $P(t)$.

Анализ предварительных исследований и литературы. Получены условия однородного (по оси и сечению) взрыва цилиндрических проводников в воздухе и воде [3-7]. Для взрыва проводников в воздухе в [5] показано, что все параметры однородны вплоть до момента взрыва только для очень тонких проводников (диаметром $\leq 0,1$ мм). Эксперименты в этой работе проводили при плотности тока $j \cong 10^{11}$ А/м². Авторами [6,7] исследованы условия возникновения радиальной (обусловленной скин-эффектом или магнитным давлением) и осевой (винтовой и перетяжной), а также перегретой неоднородностей проводников при подводном электровзрыве. Численное моделирование

процессов при неоднородных режимах ЭВП на разных его стадиях описаны в [7-9].

Для анализа характера взрыва на каждой из его стадий используют критерии подобия электрических характеристик взрыва, полученные в [10]: Π_1 (характеризующий приближенное подобие начальной стадии взрыва), Π_2 (определяющий фазу взрыва) и Π_3 (определяющий подобие следующей за взрывом стадии). Последний критерий существенно зависит от длины проводника, поэтому при соответствующем выборе параметров можно рассчитывать на то, что «дуговая» стадия взрыва будет для всех проводников подобной или близкой к этому.

В работе [11] показано, что при выборе «оптимальных» длины и диаметра проводников все параметры однородны в процессе взрыва на всех стадиях нагрева вплоть до начала испарения, т.е. условие оптимальности является условием однородности.

Однако до настоящего времени даже для однородных режимов электровзрыва не получены аналитические выражения, позволяющие рассчитывать ток, напряжение и давление во взрывающемся проводнике.

Целью работы является разработка модели электровзрыва цилиндрических проводников, основанной на представлениях о «волне испарения».

Однородный нагрев проводника до температуры кипения. Система уравнений, моделирующая процесс нагрева твердого расширяющегося и жидкого цилиндрического проводника в электрической цепи с емкостью C и индуктивностью L , а также ее приближенное решение приведены в [2]. В работе в качестве объекта исследования выступал однородный, «согласованный» режим электрического взрыва проводников, когда вся запасенная в конденсаторах энергия выделяется за время, соответствующее первому периоду волны тока.

Выражения для диаметра и длины проводника при оптимальном режиме электровзрыва имеют вид [12]

$$d_{opt} = 2 \left[\frac{W_0}{z\gamma_0\sigma_0(\lambda_m + \lambda_b)} \right]^{\frac{1}{4}}; \quad (1)$$

$$l_{opt} = 2 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt[4]{LC}, \quad (2)$$

где $W_0 = CU_0^2/2$ – энергия, запасенная в конденсаторной батарее; $z = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление; γ_0 и σ_0 – начальные плотность и электропроводность металла; $\lambda_{m,b}$ – удельные теплоты плавления и испарения; U_0 – зарядное напряжение.

При быстром однородном нагреве проводника до температуры плавления для оптимального режима электровзрыва временная зависимость тока [2] мало отличается от синусоидальной. Учитывая только первые члены разложения ряда по степеням, получим

$$I(t) \approx U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \approx U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \left(\frac{t}{\sqrt{LC}} - \frac{t^3}{6(\sqrt{LC})^3}\right). \quad (3)$$

Временная зависимость сопротивления при нагреве проводника массой m до плавления имеет вид [2]

$$R(t) \approx R_0 \left[1 + \frac{R_0 [\beta_s + \alpha_s (\eta_s - 1)] \left(\frac{U_0}{L}\right)^2 t^3}{3mc_s} \right], \quad (4)$$

где R_0 – начальное сопротивление; β_s и α_s – средние значения температурных коэффициентов электропроводности и плотности металла; c_s – среднее значение удельной теплоемкости.

При однородном нагреве жидкого проводника ток слабо изменяется

$$I(t) \approx I^0 \approx \left[2 - R^0 / R(t_m) - \tau_m / (R(t_m)C) \right] \cdot I(t_m), \quad (5)$$

где t_m – момент окончания плавления; τ_m – время плавления; R_0 – сопротивление проводника в момент начала плавления.

Сопротивление жидкого проводника изменяется следующим образом

$$R_f(t) = R^0 + (I^0)^2 (R^0)^2 [\beta_l + \alpha_l (\eta_l - 1)] t / (mc_l), \quad (6)$$

где β_l и α_l – средние значения температурных коэффициентов электропроводности и плотности жидкого металла; c_l – среднее значение удельной теплоемкости жидкого металла.

Моделирование процесса испарения проводника. Объемное испарение невозможно даже при однородном режиме нагрева, так как температура кипения сильно зависит от давления, а магнитное давление, создаваемое текущим по проводнику током $I(t)$, неоднородно

$$P(r, t) \approx P(a) + \mu \left(\frac{I(t)}{2\pi a(t)} \right)^2 \left(1 - \frac{r^2}{a^2(t)} \right), \quad (7)$$

где $P(a)$ – внешнее давление на поверхности проводника; a – радиус проводника; μ – магнитная проницаемость.

Процесс испарения является существенно неоднородным и нестационарным. Так как температура кипения возрастает с ростом давления, а на поверхности проводника давление минимально, то при достижении температуры кипения поверхностный слой проводника начинает испаряться.

Для того, чтобы процесс испарения был реализован в виде волны, то есть непрерывно, необходимо, чтобы за время фазового перехода в i -м слое

($i = 0, 1, 2, \dots, n$, считая от границы проводника) температура в $(i + 1)$ -м слое поднялась до величины, равной температуре кипения T_b^{i+1} , то есть должно выполняться равенство

$$c \cdot \Delta T_b^{i+1} = \lambda_b^i,$$

где λ_b^i – скрытая теплота испарения в i -м слое, $\Delta T_b = T_b - T(t - \tau)$.

Поскольку неоднородность в процессе испарения обусловлена зависимостью магнитного давления от радиуса, обозначим толщину слоя δ_p . Так как

$$\Delta T_b \approx (dT_b / dP) \cdot \Delta P \approx (dT_b / dP) (dP / dr) \delta_p,$$

то из приведенных выражений можно найти толщину испаряющегося слоя

$$\delta_p \approx \frac{\lambda_b^i}{c_i} \cdot \frac{dP}{dT_b} \cdot \left(\frac{dP}{dr} \right)^{-1}, \quad (8)$$

где dP/dT_b – изменение давления с температурой вдоль кривой фазового равновесия жидкость-газ, определяемое экспериментально или из уравнения Клапейрона-Клаузиуса

$$T_b = \left(\frac{1}{T_{b,atm}} - \frac{R^* \cdot \ln(P/P_{atm})}{\lambda_b \cdot M} \right)^{-1}, \quad (9)$$

где $T_{b,atm}$ – температура кипения при атмосферном давлении; M – молярная масса; R^* – универсальная газовая постоянная.

Определив dP/dr из выражения (7), находим радиальную зависимость характерного размера толщины слоя, в котором происходит кипение,

$$\delta_p \approx \frac{\lambda_b}{cP(0)} \cdot \frac{dP}{dT_b} \cdot \frac{a^2}{2r}. \quad (10)$$

Так как температура проводника однородна до начала кипения, то изменение удельной внутренней энергии на фронте волны $\Delta \epsilon = \lambda_b$, а скорость перемещения волн фазовых превращений определяется выражением

$$u \approx \frac{I^0 R^0 \delta_p}{m \lambda_b} - v, \quad (11)$$

где $v = 0,5 \alpha_l r I^2 R / (mc_l)$ – скорость теплового расширения проводника.

Радиус проводника при испарении быстро уменьшается. Пусть скорость волны испарения $u = \text{const}$. Обозначив момент начала испарения t_f , $p = u / a(t_f)$, получим

$$a(t) \approx a(t_f) (1 - pt).$$

Сопротивление проводника в процессе испарения уменьшается от значения $R(t_f) = R_b$ следующим образом

$$R = \sigma^{-1} l / \pi a^2(t) \approx R_b (1 + 2pt). \quad (12)$$

Тогда при начальных условиях

$$I(t_f) = I_b; \quad (dI/dt)_{t_f} = 0; \quad R(t_f) = R_b$$

приближенное решение уравнения цепи имеет вид

$$I(t) = I_b \exp \left[- \left(\frac{R_b p}{L} + \frac{1}{2LC} \right) t^2 \left(1 - \frac{R_b}{3L} t + \dots \right) \right]. \quad (13)$$

Найдем аналитическую зависимость давления от мощности $N(t) = I^2(t) R(t)$ для стадии взрывного испарения проводника при $t > t_f$, используя выражения (12) и (13)

$$N(t) = N(t_f) \left[\left(1 + 2pt - \left(\frac{2pR_b}{L} + \frac{1}{LC} \right) t^2 \right) \right], \quad (14)$$

где

$$N(t_f) \approx \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t_m^2 k_m^2 R_0 \left(1 + \frac{k_m^2}{mc_0} \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 R^0 [\beta_i + \alpha_i (\eta_i - 1)] t_f \right).$$

Запишем известное уравнение баланса энергии, отнесенное к длине проводника l , [13]

$$p \frac{dS}{dt} + \frac{1}{\zeta_a - 1} \frac{d(PS)}{dt} = \frac{N}{l}, \quad (15)$$

где S – площадь сечения проводника; ζ_a – показатель адиабаты.

Используем известную зависимость давления на поверхности расширяющегося цилиндрического проводника от площади поперечного сечения [14]

$$P = \frac{\gamma}{2\pi} \frac{d^2 S}{dt^2} \ln \left(\frac{\sqrt{\pi l}}{\sqrt{S}} \right) - \frac{\gamma}{8\pi S} \left(\frac{dS}{dt} \right)^2. \quad (16)$$

$\ln \left(\frac{\sqrt{\pi l}}{\sqrt{S}} \right) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\pi l^2}{S} \right)$ можно разложить в ряд, используя выражение $\ln x \approx \frac{x-1}{x}$ (при $x > 0,5$).

Тогда $\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\pi l^2}{S} \right) \approx \frac{1}{2} \left(1 - \frac{S}{\pi l^2} \right)$, а уравнение (16)

примет вид

$$P = \frac{\gamma}{4\pi} \frac{d^2 S}{dt^2} - \frac{\gamma}{4\pi^2 l^2} \frac{d^2 S}{dt^2} S - \frac{\gamma}{8\pi S} \left(\frac{dS}{dt} \right)^2. \quad (17)$$

Начальные условия $S_0 = S(t_f)$, $P_0 = P(t_f) + P_a$.

Давление на поверхности проводника в момент взрыва t_f можно найти из уравнения Клапейрона

$$P(t) = \frac{\gamma(t_f, P_a)}{M} R^* T_b(P_a). \quad (18)$$

Запишем выражение для мощности (14) в виде ряда

$$N = N_0 + N_1 t + N_2 t^2, \quad (19)$$

где

$$N_0 = N(t_f); \quad N_1 = 2pN(t_f);$$

$$N_2 = -N(t_f) \left(\frac{2pR_b}{L} + \frac{1}{LC} \right).$$

После подстановки в (17), получим приближенное решение уравнения в виде степенных рядов

$$S = S_0 + S_1 t + S_2 t^2; \quad (20)$$

$$P = P_0 + P_1 t + P_2 t^2, \quad (21)$$

где

$$S_1 = \sqrt{\frac{8\pi P_0 S_0}{\gamma(t_f)}}; \quad S_2 = \frac{\gamma(t_f) S_1^3 + 8\pi^2 l^2 P_1 S + 8\pi^2 l^2 P_0 S_1}{4\pi \gamma(t_f) l^2 S_1};$$

$$P_1 = \frac{nN_0 - \zeta_a P_0 S_1}{S_0}; \quad P_2 = \frac{nN_1 - (\zeta_a + 1) P_1 S_1 - 2\zeta_a P_0 S_2}{2S_0};$$

$$n = (1 - \zeta_a) / l.$$

Таким образом, получены аналитические выражения (12), (13), (19) - (21), устанавливающие связь между электротехническими параметрами установки, характеристиками материала, размерами проводника и давлением во взрывающемся проводнике.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов.

В качестве экспериментальных данных использованы осциллограммы тока и напряжения, полученные в процессе согласованного режима электровзрыва вольфрамового проводника длиной 87 мм и диаметром 0,35 мм при параметрах электрического контура $U_0 = 20$ кВ; $C = 6$ мкФ; $L = 4,5$ мкГн.

В результате расчета при указанных выше электротехнических параметрах были получены временные зависимости сопротивления (рис. 1), тока и напряжения $U(t) \approx I(t) \cdot R(t)$ (рис. 2).

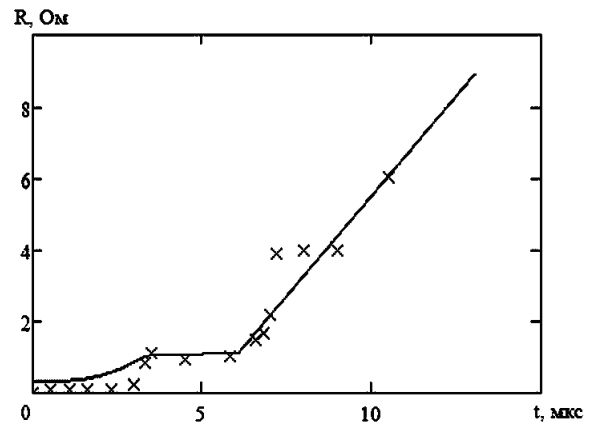


Рисунок 1 – Временная зависимость сопротивления; XXX – экспериментальные значения сопротивления

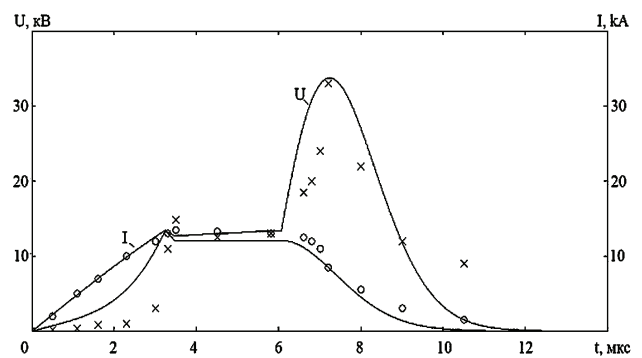


Рисунок 2 – Временные зависимости тока и напряжения; XXX – экспериментальные значения напряжения; OOO – экспериментальные значения тока

Проведенное сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей тока и напряжения показало, что полученные аналитические зависимости для тока и сопротивления для моделирования нагрева проводника и волны испарения могут быть использованы для количественного описания согласованных режимов электровзрыва.

В результате расчета были получены временные зависимости мощности (рис. 3), площади сечения канала разряда (рис. 4) и давления (рис. 5).

Проведено сравнение с кривой мощности, полученной по экспериментальным данным тока и напряжения.

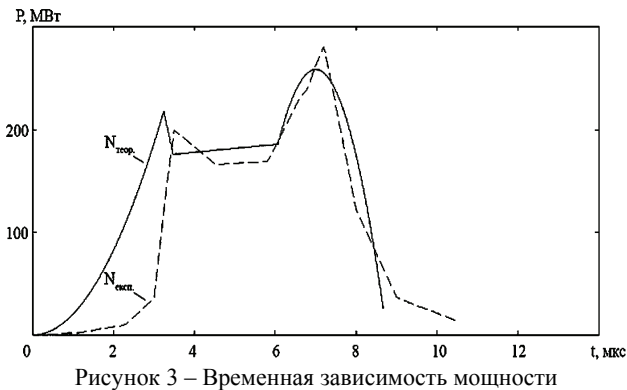


Рисунок 3 – Временная зависимость мощности

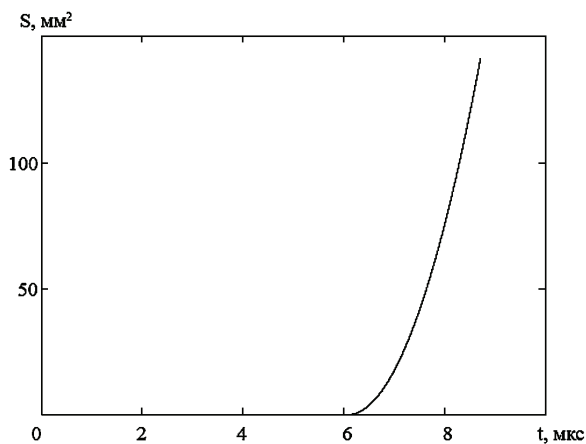


Рисунок 4 – Временная зависимость площади сечения канала разряда

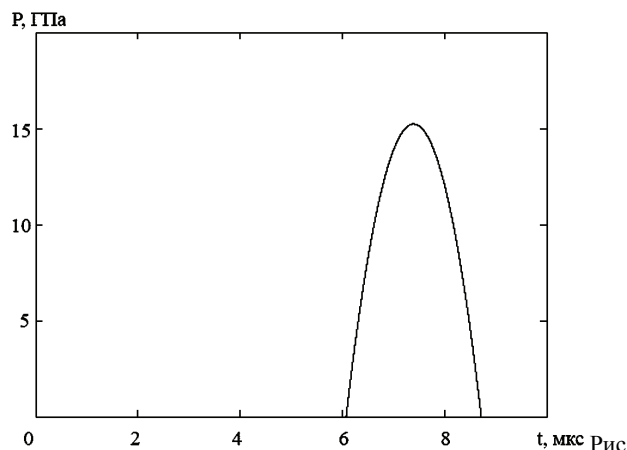


Рисунок 5 – Временная зависимость давления на поверхности расширяющегося проводника

Выводы. Разработана математическая модель электровзрыва цилиндрических проводников, основанная на представлении о волне испарения. Получены аналитические выражения для временных зависимостей тока, сопротивления и давления от параметров электроустановки и характерных размеров проводника

ка в процессе однородного нагрева цилиндрических проводников импульсным током.

Получены аналитические выражения, устанавливающие связь между импульсным давлением во взрывающемся проводнике и электроэнергетическими параметрами, характеристиками материала и размерами проводника.

Анализ полученных выражений позволил сделать следующие выводы:

- импульсное давление во взрывающемся проводнике зависит от величины $(U_0/L)^2$, начального сопротивления, размеров и материала проводника;
- от емкости зависят оптимальные размеры проводника.

Список литературы: 1. Бурцев В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лучинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 2. Бакларь В. Ю. Электрофизические параметры синтеза углеродных наноструктур в процессе электровзрыва / В. Ю. Бакларь, Н. И. Кускова, С. А. Хайнацкий // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП». – 2014. – № 50 (1092). – С. 3-12. 3. Кускова Н. І. Теоретичне дослідження динаміки фазових перетворень в результаті мікросекундних електричних вибухів провідників циліндричної форми / Н. І. Кускова, С. І. Ткаченко // Український фізичний журнал. – 1999. – Т. 44, № 3. – С.351–356. 4. Ткаченко С. І. Однородність проводника, нагріваемого імпульсом тока / С. І. Ткаченко // Письма в журнал технической физики. – 2002. – Т. 28, вып. 15. – С. 37–41. 5. Лебедев С. В. Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности / С. В. Лебедев, А. И. Савватимский // Успехи физических наук. – 1984. – Т. 144, вып. 2. – С. 215–250. 6. Kuskova N. I. Investigation of Liquid Metallic Wire Heating Dynamics / N. I. Kuskova, S. I. Tkachenko, S. V. Koval // Journ. Phys.: Condens. Matter. – 1997. – Vol. 9. – P. 6175-6184. 7. Рахель А. Д. Об испарении металла электрическим током высокой плотности / А. Д. Рахель // Журнал технической физики. – 1995. – Т. 65, вып. 12. – С. 27-38. 8. Коваль С. В. Исследование высокотемпературных свойств металлов методом подводного электрического взрыва проводников / С. В. Коваль, Е. В. Кривицкий, Г. Б. Раковский. – Николаев, 1989. 9. Ткаченко С. І. Моделирование ранней стадии электрического взрыва проводника / С. І. Ткаченко // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, вып. 7. – С. 138-140. 10. Кривицкий Е. В. Динамика электровзрыва в жидкости. – К.: Наукова думка, 1986. 11. Клосс А. Экспериментальные результаты взрыва вольфрамового проводника в воздухе при атмосферном давлении – сравнение с одномерной числовой моделью / А. Клосс, А. Д. Рахель, Г. Гесс // Международный журнал термодинамики. – 1998. – Vol. 19, № 3. – С. 1-9. 12. Хайнацкий С. А. Условия реализации оптимального режима электрического взрыва проводников в воде / С. А. Хайнацкий // Письма в журнал технической физики. – 2009. – Т. 35, вып. 7. – С. 15-20. 13. Кривицкий Е. В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде / Е. В. Кривицкий, В. В. Шамко. – К.: Наукова думка, 1979. 14. Наугольных К. А. Электрические разряды в воде / К. А. Наугольных, Н. А. Рой. – М.: Наука, 1971.

Bibliography (transliterated): 1. Burcev V. A. Elektricheskij vzryv i ego primeneniye v elektrofizicheskikh ustanovkakh. V. A. Burcev, N. V. Kalinin, A. V. Luchinskij. M.: Energoatomizdat, 1990 Print. 2. Baklar V. Yu. Elektricheskie parametry sinteza uglerodnykh nanostructure v protsessе elektrovzryva. V. Yu. Baklar, N. I. Kuskova, S. A. Kha-jnackij. Visnyk NTU "KhPI". Zbirnyk naukovykh prac'. Tehnika ta elektrofizyka vysokykh naprug. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. No 50 (1092). 3-12 Print. 3. Kuskova N.I, Tkachenko S.I. Teoretychne doslidzhennia dynamiky fazovykh peretvoren v rezultati mikrosekundnykh elektrichnykh vybukhiv providnykiv tsylindrychnoi formy. Ukrainskyi fizychnyi zhurnal, 1999. Vol. 44, No 3. 351-356 Print. 4. Tkachenko S. I. Odnorodnost' provodnika, nagrevaemogo impulsomтока. S. I. Tkachenko. Pis'ma v zhurnal tehnichekoj fiziki. 2002. Vol. 28, vyp. 15. 37-41 Print. 5. Lebedev S. V. Metally v protsessе bystrogo nagrevaniya elektrichskim tokom bol'shoj plotnosti. S. V. Lebedev, A. I. Savvatimskij. Usphehifizicheskikh nauk. 1984. Vol. 144, vyp. 2. 215-250 Print. 6. Kuskova N. I. Investigation of Liquid Metallic Wire Heating Dynamics.

N. I. Kuskova, S. I. Tkachenko, S. V. Koval. Journ. Phys.: Condens. Matter. 1997. Vol. 9. 6175-6184 Print. 7. Rahe'l' A. D. Ob isparenii metalla elektricheskim tokom vysokoj plotnosti. A. D. Rahe'l'. Zhurnal tehnichejskoj fiziki. 1995. Vol. 65, vyp. 12. 27-38 Print. 8. Kovavl' S. V. Issledovanie vysokotemperaturnyh svojstv metallov metodom podvodnogo elektricheskogo vzryva provodnikov. S. V. Kovavl', E. V. Krivickij, G. B. Rakovskij. Nikolaev, 1989 Print. 9. Tkachenko S. I. Modelirovanie rannej stadii elektricheskogo vzryva provodnika. S. I. Tkachenko. Zhurnal tehnichejskoj fiziki. 2000. Vol. 70, vyp. 7. 138-140 Print. 10. Krivickij E. V. Dinamika elektrovzryva v zhidkosti. Kyiv: Naukova dumka, 1986 Print. 11. Kloss A. Eksperimental'nye rezultaty vzryva

vol'framovogo provodnika v vozduhe pri atmosfernom davlenii. – sravnenie s odnomernoj chislovoj model'ju. A. Kloss, A. D. Rahe'l', G. Gess. Mezhdunarodnyj zhurnal termofiziki. 1998. Vol. 19, No 3. 1-9 Print. 12. Hajnackij S. A. Uslovija realizacii optimal'nogo rezhima elektricheskogo vzryva provodnikov v vode. S. A. Hajnackij. Pis'ma v zhurnal tehnichejskoj fiziki. 2009. Vol. 35, vyp. 7. 15-20 Print. 13. Krivickij E. V. Perehodnye processy pri vysokovol'tnom razrjade v vode. E. V. Krivickij, V. V. Shamko. Kyiv: Naukova dumka, 1979 Print. 14. Naugol'nyh K. A. Elektricheskie razrjady v vode. K. A. Naugol'nyh, N. A. Roj. Moscow: Nauka, 1971 Print.

Поступила (received) 11.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бакларь Виктор Юрьевич, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної Академії Наук України, молодший науковий співробітник; тел.: (050) 864-26-23; email: baklarv@gmail.com.

Baklar Viktor Yurjevich, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Research Assistant; tel.: (050) 864-26-23; email: baklarv@gmail.com.

Кускова Наталья Ивановна, доктор технічних наук, професор, зав. відділом електрофізических досліджень Інституту імпульсних процесів і технологій Національної Академії Наук України; тел.: (050) 737-94-52; email: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; email: nataljakuskova@mail.ru.

Челпанов Дмитрий Ильич, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної Академії Наук України, аспірант; тел.: (067) 514-77-78; email: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Chelpanov Dmitry Ilych, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Postgraduate Student; tel.: (067) 514-77-78; email: chelpanoffdimitri@gmail.com.

УДК 621.3.022 : 537.311.8

М. И. БАРАНОВ, С. В. РУДАКОВ

ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА ГИТМ-10/350 ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ МОЛНИЕСТОЙКОСТИ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Приведены результаты опытной оценки стойкости образцов ряда проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами, полиэтиленовой (ПЭТ) и поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики к воздействию апериодического импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными по требованиям международных и национальных стандартов амплитудно-временными параметрами (АВП) и допусками на них. Определены максимальные численные значения предельно допустимых и критических плотностей указанного импульса тока искусственной молнии с нормированными АВП и допусками на них в рассматриваемых проводах (кабелях) силовых электрических цепей энергообъектов с ПЭТ и ПВХ изоляцией.

Ключевые слова: мощный высоковольтный генератор тока искусственной молнии; провода и кабели электрических цепей объектов электроэнергетики; молниестойкость кабельно-проводниковой продукции энергообъектов; предельно допустимые и критические плотности импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии в проводах и кабелях энергообъектов.

Введение. В 2014 году в отделе электромагнитных исследований и испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (НИО № 4) был создан уникальный мощный высоковольтный генератор типа ГИТМ-10/350 [1], воспроизводящий в низкоомной (до 0,1 Ом) и малоиндуктивной (до 1,5 мкГн) электрической нагрузке апериодические импульсы тока $\tau_f / \tau_p = 10/350$ мкс искусственной молнии обеих полярностей с нормированными согласно требованиям ряда действующих международных и национальных стандартов [2-7] амплитудно-временными параметрами (АВП) и допусками на них. Данный генератор способен обеспечить формирование на указанной RL -нагрузке испытатель-

ных импульсов тока 10/350 мкс искусственной молнии с АВП, удовлетворяющими I-IV уровням защиты от молнии объектов электроэнергетики (ОЭЭ) и их инженерных коммуникаций, включающих силовые электрические цепи. Известно, что данные цепи ОЭЭ могут содержать широкую номенклатуру проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (экранами), полиэтиленовой (ПЭТ) и поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией [8]. Следует отметить, что по требованиям стандартов [2-6] для I уровня молниезащиты ОЭЭ испытательный импульс тока искусственной молнии положительной полярности должен характеризоваться следующими АВП: амплитудой

$I_{mL} = (200 \pm 20)$ кА; временем $t_m \approx 1,6\tau_p$, соответствующим I_{mL} , не более 25 мкс; длительностью импульса τ_p на уровне $0,5I_{mL}$ не менее (350 ± 35) мкс; интегралом действия J_L тока молнии не менее $(10 \pm 3,5) \cdot 10^6$ А²·с; протекшим через нагрузку электрическим зарядом q_L не менее (100 ± 20) Кл. Для IV уровня молниезащиты ОЭЭ АВП подобного импульса тока должны составлять [2-6]: $I_{mL} = (100 \pm 10)$ кА; $t_m \leq 25$ мкс; $\tau_p = (350 \pm 35)$ мкс; $J_L = (2,5 \pm 0,875) \cdot 10^6$ А²·с; $q_L = (50 \pm 10)$ Кл. В настоящее время практически отсутствуют как методические, так и инженерно-технические рекомендации по выбору рассматриваемой кабельно-проводниковой продукции в первичных (вторичных) электрических цепях ОЭЭ, которая бы удовлетворяла требованиям молниестойкости согласно стандартов [2-7]. В этой связи проведение экспериментальных исследований по определению максимальных численных значений предельно допустимых δ_{mld} и критических δ_{mlk} плотностей импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии с указанными выше АВП и допусками на них в рассматриваемых проводах и кабелях ОЭЭ с медными (алюминиевыми) токоведущими частями, ПЭТ и ПВХ изоляцией является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное прикладное значение как для отечественной промышленной электроэнергетики, так и сильноточной высоковольтной импульсной техники.

1. Постановка задачи экспериментального исследования электротермической стойкости образцов проводов (кабелей) к импульсу тока 10/350 мкс искусственной молнии. В рамках данного исследования проведем с использованием сильноточных разрядных цепей высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 [1] испытания на электротермическую стойкость [9] коротких опытных образцов (ОО) длиной 0,5 м ряда проводов (кабелей) с круглыми сплошными медными и алюминиевыми жилами сечением S_1 , ПЭТ и ПВХ изоляцией, размещенных в воздушной среде с температурой $\theta_0 = 20$ °С. ОО испытываемых проводов (кабелей) цепей ОЭЭ перед подачей на них от указанного мощного генератора испытательного аperiодического импульса тока 10/350 мкс с АВП согласно требованиям [2-7] из-за действующих на них больших электродинамических усилий необходимо жестко закреплять в разрядной цепи указанного генератора, электрическая схема которого приведена на рис. 1. С этой целью используем рабочий стол генератора типа ГИТМ-10/350, показанный на рис. 2. На данный стол выходят массивные стальные электроды сильноточной разрядной цепи используемого генератора импульсного тока, между которыми и будут размещаться ОО испытываемых проводов и кабелей электрических цепей ОЭЭ. Считаем, что указанный выше импульс тока искусственной молнии практически равномерно распределяется по поперечному сечению S_1 медной или алюминиевой жилы ОО испытываемого провода (кабеля). Расчетная оценка глубины проникновения Δ_1 в медную или алюминиевую жилу провода (кабеля) используемого при проводимых электротермических испытаниях токового импульса

($t_m \approx 24$ мкс) показывает, что в стационарном режиме минимальное значение ее величины $\Delta_1 \approx 2[t_m/(\pi\mu_1\gamma_1)]^{1/2}$ [9], где $\mu_1 = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м и γ_1 – соответственно магнитная проницаемость и удельная электропроводность меди или алюминия при $\theta_0 = 20$ °С, составляет примерно 1 мм. Этому значению глубины Δ_1 соответствует поперечное сечение S_1 их круглых жил, равное около 3 мм².

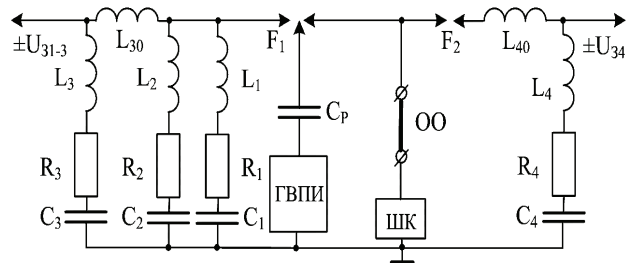


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема разрядных цепей генератора типа ГИТМ-10/350 для формирования в ОО проводов и кабелей ОЭЭ аperiодических импульсов тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными АВП и допусками на них (ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих микросекундных импульсов напряжения амплитудой до ± 100 кВ; F_1, F_2 – трех- и двух-электродный высоковольтные воздушные искровые коммутаторы ГИТ-1 – ГИТ-4; $C_p \approx 180$ пФ – разделительная емкость на импульсное напряжение до ± 120 кВ в цепи ГВПИ, управляющего срабатыванием коммутаторов F_1 и F_2 ; ОО – опытный образец провода (кабеля); ШК – шунт коаксиальный типа ШК-300 для измерения импульсных токов искусственной молнии амплитудой до ± 300 кА; $\pm U_{31-3}, \pm U_{34}$ – зарядные напряжения соответственно для ГИТ-1 – ГИТ-3 и ГИТ-4; $L_1 - L_4, R_1 - R_4$ и $C_1 - C_4$ – собственные индуктивности, активные сопротивления и емкости разрядных цепей ГИТ-1 – ГИТ-4; L_{30}, L_{40} – формирующие индуктивности разрядных цепей ГИТ-3 и ГИТ-4) [1]

Из данных рис. 1 видно, что генератор типа ГИТМ-10/350 в своем составе содержит четыре параллельно работающих генератора импульсных токов (ГИТ): ГИТ-1 – ГИТ-3, импульсные конденсаторы которых заряжаются до постоянного напряжения $\pm U_{31-3}$, и ГИТ-4, конденсаторная батарея которого заряжается до постоянного напряжения $\pm U_{34}$. Полярность зарядки ГИТ-1 – ГИТ-4 одинаковая. Она определяется требуемой полярностью испытательного импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии по [2-7]. Электрические параметры элементов, приведенных на рис. 1, были ранее описаны в [1]. Требуется при принятых допущениях в приближенном виде найти опытным путем максимальные численные значения предельно допустимых δ_{mld} и критических δ_{mlk} плотностей рассматриваемого импульсного тока искусственной молнии в ОО указанных проводов и кабелей применительно к электрическим цепям ОЭЭ.

2. Результаты опытной оценки электротермической стойкости образцов проводов (кабелей) к импульсу тока 10/350 мкс искусственной молнии. На рис. 2 показан внешний вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350, на массивных стальных электродах которого жестко закреплена сплошная круглая

медная жила сечением $S_1 \approx 9,6 \text{ мм}^2$ ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 [8] с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и предварительно снятыми нами защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном до прямого воздействия на нее испытательного аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой I_{mL} до 100 кА (случай, практически соответствующий по требованиям действующих стандартов [2-6] IV уровня молниезащиты кабельно-проводниковой продукции электрических цепей ОЭЭ).

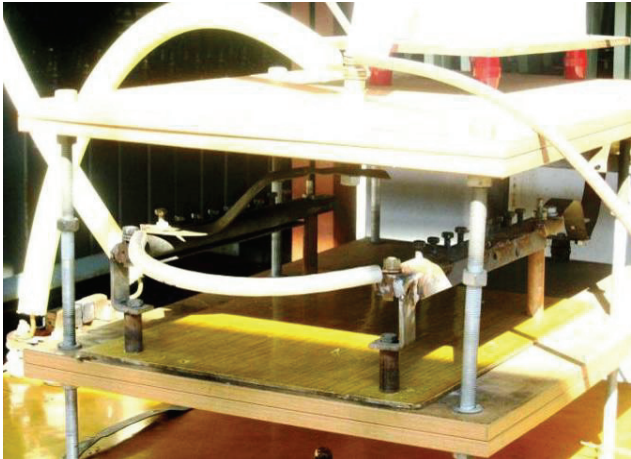


Рисунок 2 – Внешний вид рабочего стола мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 с закрепленной на его массивных стальных электродах сплошной круглой медной жилой сечением $S_1 \approx 9,6 \text{ мм}^2$ ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и снятыми его защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$ ($U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$)

На рис. 3 приведена осциллограмма аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии, протекающего в данном случае через медную жилу диаметром 3,5 мм ($S_1 \approx 9,6 \text{ мм}^2$) испытываемого ОО радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9. Эта осциллограмма была зафиксирована с помощью поверенных государственной метрологической службой измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 [10] и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012. Амплитудное значение плотности импульса тока 15/335 мкс ($I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$), удовлетворяющего требованиям [2-7], при этом в медной токоведущей части ОО испытываемого кабеля составило примерно $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 8,9 \text{ кА/мм}^2$. Визуальный осмотр исследуемого ОО кабеля марки РК Д2-3,5/9 показал, что после протекания по нему импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии с указанной плотностью δ_{m1} его медная жила и ПЭТ изоляция остались практически не поврежденными. Найденное расчетным путем в круглой медной жиле ОО радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией для данного случая ($I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$; $J_L \approx 2 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$) максимальное значение предельно допустимой плотности δ_{m1d} импульса тока 15/335 мкс

искусственной молнии из приближенного соотношения $\delta_{m1d} \approx 1,353 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$ [11] оказывается равным около $\delta_{m1d} \approx 8,2 \text{ кА/мм}^2$. Из сравнения приведенных значений δ_{m1} и δ_{m1d} в медной жиле рассматриваемого кабеля следует, что расчетное значение плотности тока $\delta_{m1d} \approx 8,2 \text{ кА/мм}^2$ в ней отличается от ее опытного значения $\delta_{m1} \approx \delta_{m1d} \approx 8,9 \text{ кА/мм}^2$ примерно на 8 %.

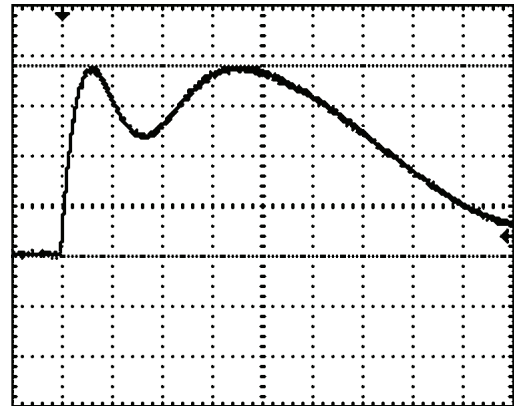


Рисунок 3 – Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде конденсаторов его ГИТ-1 – ГИТ-4 на сплошную круглую медную жилу сечением $S_1 \approx 9,6 \text{ мм}^2$ радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и снятыми его защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном ($I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 8,9 \text{ кА/мм}^2$; $\tau_f \approx 15 \text{ мкс}$; $t_m \approx 25 \text{ мкс}$; $\tau_p \approx 335 \text{ мкс}$; $J_L \approx 2 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$; $q_L \approx 42 \text{ Кл}$; $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

На рис. 4 приведен общий вид закрепленного на электродах сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 отрезка длиной 0,5 м радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией [8], содержащего расщепленную круглую медную жилу сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$, до воздействия на него испытательного импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой до $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$.

На рис. 5 представлена осциллограмма аperiodического импульса тока, протекающего через медную жилу сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$ испытываемого ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11, которая подвергается электрическому взрыву (ЭВ) [12].

Из данных рис. 5 следует, что сублимация меди при ЭВ токоведущей жилы ОО радиочастотного кабеля марки РК 50-7-11 вызывает определенную деформацию испытательного аperiodического импульса тока в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350. Происходит незначительное возрастание времени t_m (до 28 мкс) и более заметное уменьшение длительности τ_p (до 310 мкс) для испытательного импульса тока. Амплитудное значение плотности импульса тока в электрически взрывающейся медной жиле исследуемого ОО радиочастотного кабеля марки РК 50-7-11 при этом достигает около $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$. Расчетное максимальное значение критической плот-

ности импульса тока 17/310 мкс искусственной молнии, найденное по приближенному соотношению $\delta_{m1k} \approx 4,416 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$ [11] для данного электротермического случая ($I_{mL} \approx 82,9$ кА; $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6$ А²·с), составляет в медной жиле указанного кабеля около $\delta_{m1k} \approx 27,6$ кА/мм². Отметим, что определение значений интеграла тока искусственной молнии J_L и протекшего при испытаниях через ОО проводов (кабелей) заряда q_L осуществлялось нами по приближенным расчетным соотношениям, рекомендуемым в [11]. Видно, что опытное амплитудное значение $\delta_{m1} \approx \delta_{m1k} \approx 25,9$ кА/мм² критической плотности импульса тока 17/310 мкс искусственной молнии для медной жилы исследуемого ОО кабеля с ПЭТ изоляцией отличается от найденного соответствующего расчетного значения подобной плотности тока $\delta_{m1k} \approx 27,6$ кА/мм² примерно на 6 %.

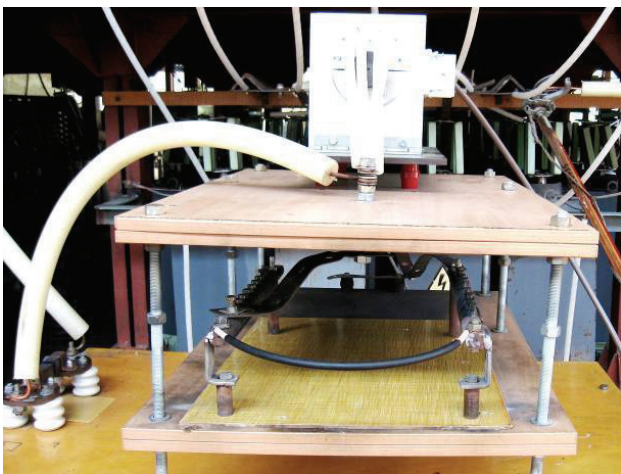


Рисунок 4 – Внешний вид рабочего стола мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 с закрепленной на его массивных стальных электродах расщепленной круглой медной жилой сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и «заглушенным» при испытаниях его медным экраном-оплеткой до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6$ кА ($U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ)

На рис. 6 показан общий вид ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией [8] длиной 0,5 м, сплошная круглая алюминиевая жила которого сечением $S_1 \approx 6$ мм² жестко закреплена на массивных стальных электродах рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350, до воздействия на него испытательного импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой до $I_{mL} \approx 85,6$ кА. В этом случае электротермических испытаний вторая алюминиевая жила исследуемого провода была «заглушена» и выведена из силовоточной разрядной цепи используемого генератора импульсного тока. На рис. 7 приведена осциллограмма большого импульсного тока аperiodической временной формы, протекающего через указанную алюминиевую жилу провода марки АППВнг2х6 при ее ЭВ в силовоточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350. Электрофизическое явление ЭВ алю-

миниевой жилы провода марки АППВнг2х6 [8], наступающее согласно изменению характера «хода» во времени кривой импульсного тока на рис. 7 относительно соответствующей токовой кривой на рис. 3 на спаде аperiodического импульса тока имитированной молнии, приводит к заметному укорочению данного токового импульса ($\tau_p \approx 265$ мкс). Плотность импульсного тока при этом виде испытаний ($I_{mL} \approx 83,8$ кА; $J_L \approx 1,58 \cdot 10^6$ А²·с) в алюминиевой жиле исследуемого ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией составила примерно $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 14$ кА/мм². Выполненная расчетная оценка максимальной критической плотности импульса тока 17/265 мкс искусственной молнии в алюминиевой жиле провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией по соотношению $\delta_{m1k} \approx 2,863 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$ [11] показывает, что она будет равной примерно 19 кА/мм².

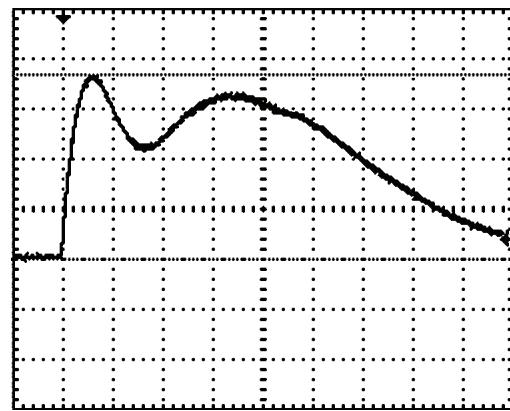


Рисунок 5 – Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде конденсаторов его ГИТ-1 – ГИТ-4 на электрически взрывающуюся расщепленную круглую медную жилу сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и «заглушенным» при испытаниях его медным экраном-оплеткой ($I_{mL} \approx 82,9$ кА; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9$ кА/мм²; $\tau_f \approx 17$ мкс; $t_m \approx 28$ мкс; $\tau_p \approx 310$ мкс; $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6$ А²·с; $q_L \approx 37,9$ Кл; $U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

Таким образом, полученное опытное максимальное значение критической плотности импульса тока 17/265 мкс $\delta_{m1k} \approx 14$ кА/мм² имитированной молнии для алюминиевой жилы провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией отличается от ее расчетного значения $\delta_{m1k} \approx 19$ кА/мм² примерно на 26 %. Выполненные в дальнейшем на генераторе типа ГИТМ-10/350 эксперименты с применением ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м показали, что при параллельном включении его двух круглых алюминиевых жил общим сечением $S_1 \approx 12$ мм² в силовоточную разрядную цепь используемого генератора большого импульсного тока ОО провода выдерживает оказанное на него сильное электротермическое и электродинамическое воздействие ($I_{mL} \approx 83,8$ кА; $J_L \approx 1,91 \cdot 10^6$ А²·с). Осциллограмма испытательного импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 83,8$ кА в этом случае практически повторила осциллограмму, показанную на рис. 3. Ам-

плитуда плотности импульсного тока в алюминиевых жилах ОО указанного провода составляла в этом случае около $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 6,9$ кА/мм². Расчетное максимальное значение предельно допустимой в «спаренных» алюминиевых жилах ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией плотности импульса тока 15/335 мкс из оценочного соотношения $\delta_{m1d} \approx 0,975 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$ [11] в данном случае оказывается равным $\delta_{m1d} \approx 5,9$ кА/мм².

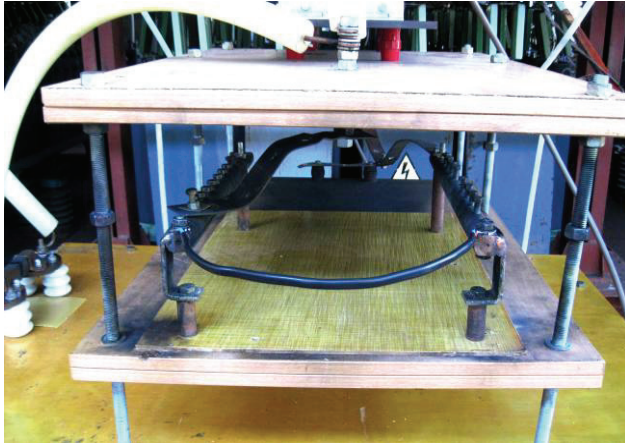


Рисунок 6 – Общий вид рабочего стола мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 с закрепленной на его массивных стальных электродах сплошной круглой алюминиевой жилой сечением $S_1 \approx 6$ мм² ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6$ кА ($U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ)

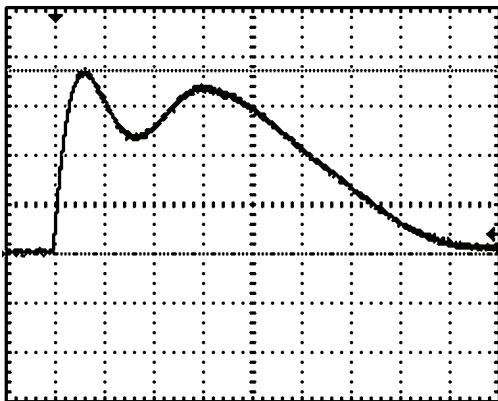


Рисунок 7 – Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде конденсаторов его высоковольтных ГИТ-1 – ГИТ-4 на электрически взрывающуюся сплошную круглую алюминиевую жилу сечением $S_1 \approx 6$ мм² провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м ($I_{mL} \approx 83,8$ кА; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 14$ кА/мм²; $\tau_f \approx 17$ мкс; $t_m \approx 28$ мкс; $\tau_p \approx 265$ мкс; $J_L \approx 1,58 \cdot 10^6$ А²·с; $q_L \approx 33,3$ Кл; $U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

Из приведенных выше для испытываемого ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией [8] и общим сечением $S_1 \approx 12$ мм² его двух алюминиевых жил количественных данных следует, что найденное

для него расчетное значение предельно допустимой плотности импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии $\delta_{m1d} \approx 5,9$ кА/мм² отличается от ее соответствующего опытного значения $\delta_{m1d} \approx 6,9$ кА/мм² примерно на 14 %.

Выводы. 1. Впервые экспериментально установлено, что для медных жил электрических проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией предельно допустимая плотность импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии численно составляет примерно $\delta_{m1d} \approx 9$ кА/мм², а для алюминиевых жил электрических проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией – примерно $\delta_{m1d} \approx 6$ кА/мм².

2. Из выполненных на уникальном мощном высоковольтном генераторе типа ГИТМ-10/350 разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» сильноточных экспериментов следует, что критическая плотность импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии в медных жилах электрических проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией численно составляет около $\delta_{m1k} \approx 26$ кА/мм², а в алюминиевых жилах электрических проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией – около $\delta_{m1k} \approx 14$ кА/мм².

3. Полученные приближенные численные значения для предельно допустимых δ_{m1d} и критических δ_{m1k} плотностей импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии могут использоваться при выборе кабельно-проводниковой продукции для электрических цепей ОЭЭ, отвечающей согласно действующим международным и национальным стандартам требованиям функциональной и противопожарной безопасности энергообъектов к грозовым разрядам в воздушной атмосфере.

Список литературы: 1. Баранов М.И. Мощный высоковольтный генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами / М.И.Баранов, Г.М.Колушико, В.И.Кравченко, С.В.Рудаков // Электротехніка і електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 51–56. 2. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. – Part 1: General principles». – Geneva, Publ. IEC, 2010. 3. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning. – Part 2: Risk management». – Geneva, Publ. IEC, 2010. 4. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning. – Part 3: Physical damage to structures and life hazard». – Geneva, Publ. IEC, 2010. 5. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning. – Part 4: Electrical and electronic systems within structures». – Geneva, Publ. IEC, 2010. 6. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р МЭК 62305-1. – 2010. «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы». – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с. 7. Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001). Blitzschutzbauteile. – Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile. – Berlin: Buchverlag DS, 2008. – 16 s. 8. Белоруссов Н.И. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Н.И.Белоруссов, А.Е.Саакян, А.И.Яковлева. Под ред. Н.И.Белоруссова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с. 9. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач / М.И.Баранов. – Х.: Точка, 2010. – 407 с. 10. Баранов М.И. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов / М.И.Баранов, Г.М.Колушико, В.И. Кравченко, О.С.Недзельский, В.Н.Дныщенко // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81–85. 11. 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. 12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач / М.И.Баранов. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

Bibliography (transliterated): 1. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. Moshhnyj vysokovol'nyj generator aperiodicheskikh impul'sov toka iskusstvennoj molnii s normirovannymi po mezhdunarodnomu standartu IEC 62305-1-2010 amplitudno-vremennymi parametrami. Elektrotehnika i elektromehanika. 2015. No 1. 51–56 Print. 2. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, Publ. IEC, 2010 Print. 3. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning. Part 2: Risk management». – Geneva, Publ. IEC, 2010 Print. 4. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard». Geneva, Publ. IEC, 2010 Print. 5. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures». Geneva, Publ. IEC, 2010 Print. 6. Nacional'nyj standart RF GOST R MEK 62305-1-2010. «Menedzhment riska. Zashhita ot molnii. Chast' 1: Obshhie principy». Moscow, Standartinform, 2011. 46 Print. 7. Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001). Blitzschutzbautei-

le.–Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile.– Berlin, Buchverlag DS, 2008, 16 Print. 8. Belorussov N.I., Saakyan A.E., Yakovleva A.I. Elektricheskie kabeli, provoda i shnury: Spravochnik. Pod red. N.I. Belorussova. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 536 Print. 9. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kniga. 2: Teorija elektrofizicheskikh effektov i zadach.– Har'kov, Tochka, 2010, 407 Print. 10. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskiy O.S., Dnyshchenko V.N. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja naturnyh ispytaniy tehniceskikh ob'ektov. Pribory i tehnika eksperimenta. 2008. No 3. 81–85 Print. 11. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Elektrotermicheskaja stojkost' provodov i kabelej letatel'nogo apparata k porazhajushhemu dejstviju impul'snogo toka molnii. Elektrichestvo. 2013. No 10. 7–13 Print. 12. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika elektrofizicheskikh zadach. Kharkiv: Tochka, 2014. 400 Print.

Поступила (received) 20.10.2015

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» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

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

Рудаков Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет гражданской защиты Украины, доцент кафедры ППНП, г. Харьков; тел.: (057) 707-34-38; e-mail: serg_73@i.ua.

Rudakov Sergey Valer'evich – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, National University of Civil Protection of Ukraine, Associate professor of department of Fire Prophylaxis of Settlements, Kharkov; tel.: (057) 707-34-38; e-mail: serg_73@i.ua.

УДК 519.2

Р. К. БОРИСОВ, Д. И. КОВАЛЕВ, Г. М. КОЛИУШКО, О. С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ, Е. Г. ПОНУЖДАЕВА

ТРЕБОВАНИЯ К УСТРОЙСТВАМ БЛОКИРОВКИ ОПЕРАТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ИЗГОТОВЛЕНИИ НОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Рассмотрены требования к устройствам блокировки оперативных переключений коммутационных аппаратов высокого напряжения, используемых на энергообъектах. Описаны научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию блокирующего устройства нового комплекса электрооборудования для повышения надежности и электробезопасности персонала при производстве оперативных переключений в распределительных устройствах напряжением 6–750 кВ электрических станций и подстанций. Представлена схема электрическая, и описана конструкция опытного образца устройства, прошедшего приемочные испытания в составе комплекса электрооборудования.

Ключевые слова: устройство блокировки, оперативные переключения, коммутационные аппараты, электробезопасность, высокое напряжение, распределительные устройства, электрические станции.

Введение. Проблема повышения безопасности работы персонала, а также исключения им ошибочных действий при оперативных переключениях коммутирующих устройств высоковольтного оборудования энергообъектов определяет ряд требований, предъявляемых к разработке и изготовлению новых комплексов электротехнического оборудования (КЭО). Качественное электроснабжение невозможно без внедрения передовых проектных решений с использованием «интеллектуального» управления КЭО, повышающего надежность работы в целом.

В состав КЭО входит система оперативных блокировок безопасности (ОББ), элементом которой яв-

ляется устройство блокировки оперативных переключений (УБОП).

Анализ требований к устройствам блокировки нового поколения. Находящиеся в эксплуатации устройства блокировки, а именно замки ЗБ–1, имеют малые габариты, простую конструкцию, что определяет их надежность и выполнение основных требований к ним [1]. Однако при деблокировании используется дополнительный элемент – электромагнитный ключ КЭЗ–1, либо магнитный ключ КЗ–1 [2], что усложняет действия персонала. Использование оперативного напряжения 220 В увеличивает опасность поражения

током. На подстанциях нового поколения применяется программная блокировка [3], что делает невозможным применение ранее используемых замков из-за отсутствия возможности передачи сигнала о его состоянии (открыт он или закрыт.)

Габаритные размеры и масса устройств нового поколения должны быть такими, чтобы их применение не требовало увеличения площади, занимаемой распределительными устройствами и щитами управления станций и подстанций. Посадочные размеры должны быть сохранены в целях взаимозаменяемости устанавливаемых устройств без дополнительной доработки конструкции. Особое внимание нужно уделить требованиям по долговечности. Срок службы устройств должен быть не менее 25 лет, обеспечена ремонтпригодность. Повышение технологичности устройств при техническом обслуживании и ремонте достигается повышением контролепригодности, легкосъемности, взаимозаменяемости изделия, унификацией и стандартизацией сборочных единиц и деталей [4]. Новая продукция должна быть рыночно ориентированной, конкурентоспособной к лучшим отечественным и мировым аналогам на объектах электроэнергетики напряжением 6–750 кВ.

Проанализировав все требования, специалисты НТУ «ХПИ» г. Харьков и НИУ «МЭИ» г. Москва в совместном сотрудничестве провели научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы (НИОКР) по разработке блокирующего устройства, включающие 5 этапов от эскизного проекта до разработки конструкторской документации в части блокирующего устройства.

Описание разработки. В процессе разработки нового устройства были изготовлены 5 опытных образцов. Первые два разрабатывались параллельно, отрабатывались кинематические схемы. По результатам испытаний более надежная схема была взята за основу. Дальнейшие работы по упрощению электрической схемы, узлов и деталей, уменьшению габаритов, улучшению показателей долговечности и ремонтпригодности привели к созданию еще трех опытных образцов [5–7]. Окончательным вариантом разработок является опытный образец № 5.

Внешний вид образца № 5 изображен на рис. 1, основные технические характеристики приведены в табл. 1.

Конструкция опытного образца № 5 представлена на рис. 2.

Таблица 1 – Основные технические характеристики УБОП

Наименование параметра или характеристики	Значение
1. Рабочий ход запирающего штока, мм	14^{+2}_{-1}
2. Диаметр запирающего штока, мм	$12^{-0,18}$
3. Усилие открытия замкового механизма, Н – начальное, не менее – конечное, не более	5 20
4. Напряжение питания обмотки электромагнита, В (постоянного тока).	12 ± 2
5. Ток в катушке электромагнита, А, не более	0,35
6. Габаритные размеры, мм, не более	80×120
7. Масса, кг, не более	0,7



Рисунок 1 – Опытный образец №5 с разных ракурсов

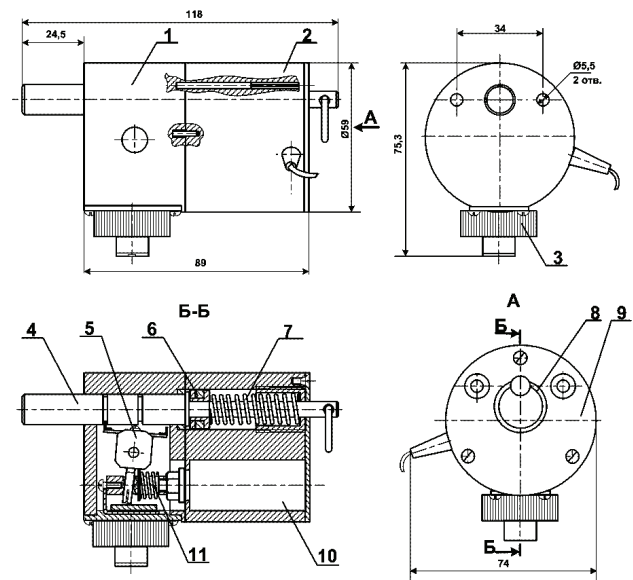


Рисунок 2 – Конструкция: 1 – основание, 2 – цилиндр, 3 – устройство аварийного деблокирования, 4 – шток, 5 – механизм блокировки, 6 – магнит, 7 – пружина, 8 – кольцо, 9 – крышка, 10 – электромагнит, 11 – пружина

Опытный образец № 5 представляет собой корпус, состоящий из двух частей, основания 1 и цилиндра 2, скрепляемых винтами. Внутри основания размещены механизм блокировки 5 и устройство аварийно-

го отключения 3. Со стороны крышки 9 выведен шток 4 с кольцом 8. Цилиндр содержит элементы электрической схемы (см. рис. 3)

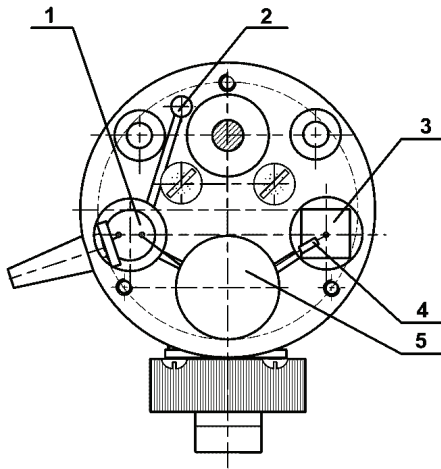


Рисунок 3 – Конструкция: 1 – низкоимпедансный электролитический конденсатор 2200 мкФ × 16 В – С1; 2 – геркон KSK 1С90 – 1526 – SF1; 3 – резистор в керамическом корпусе 100 Ом мощностью 5 Вт – R1; 4 – диод 1N4007 – VD1; 5 – электромагнит тянущий ЕМА-1939L-12 – K1

Устройство работает следующим образом: пружина 11, вытягивающая сердечник электромагнита при обесточенной катушке, удерживает механизм блокировки таким образом, что подпружиненная защелка попадает в проточку на штоке 4 и удерживает его в максимально выдвинутом положении, что соответствует закрытому состоянию.

Перемещение штока 4 из закрытого состояния в открытое осуществляется оператором при наличии оперативного напряжения (+24 В) на входе электрической схемы. На катушке появляется питание, сердечник втягивается, при этом механизм блокировки поворачивается вокруг оси, закрепленной в корпусе устройства, защелка выходит из проточки, освобождая шток. Оператор получает возможность, потянув за кольцо 8, переместить шток в осевом направлении, при этом подпружиненная защелка попадет во вторую проточку на штоке и зафиксирует его в этом положении, что соответствует открытому состоянию.

После снятия напряжения пружина 11 возвращает сердечник электромагнита в первоначальное положение, механизм блокировки, поворачиваясь вокруг оси, освобождает шток, который под действием возвратной пружины 7 перемещается вдоль оси до момента фиксации в закрытом состоянии.

При обоснованной необходимости (отсутствие оперативного напряжения, обрыв или короткое замыкание в цепях питания электромагнита, поломка элементов механизма УБОП) открыть УБОП вручную нужно повернуть ручку 2, соединенную с эксцентриком (см. рис. 4) устройства аварийного деблокирования на 90°. Эксцентрик задвинет сердечник электромагнита и освободит шток. Потянув за кольцо 8, шток переместить в осевом направлении до фиксации в открытом состоянии. Далее оператор производит необ-

ходимые переключения электрооборудования. Действия по приведению УБОП в закрытое состояния производится поворотом ручки на 90°. Устройство аварийного деблокирования включает в себя эксцентрик 1, с помощью которого осуществляется возвратно-поступательное перемещение сердечника электромагнита.

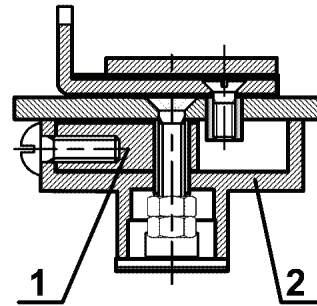


Рисунок 4 – Устройство аварийного деблокирования: 1 – эксцентрик, 2 – ручка

Корпус, выполненный из теплопроводящего алюминиевого сплава, обеспечивает максимальную теплопередачу в окружающую среду и недопущение перегрева электромагнита 10. Для улучшения теплоотдачи зазор между поверхностями корпуса электромагнита и корпуса устройства заполнен теплопроводящей пастой КТП-8. Такие конструктивные решения повышают надежность работы устройства и долговечность его использования, о чем свидетельствуют экспериментальные исследования термодинамических показателей работы образца УБОП в длительном режиме [6].

Электрическая схема, представлена на рис. 5.

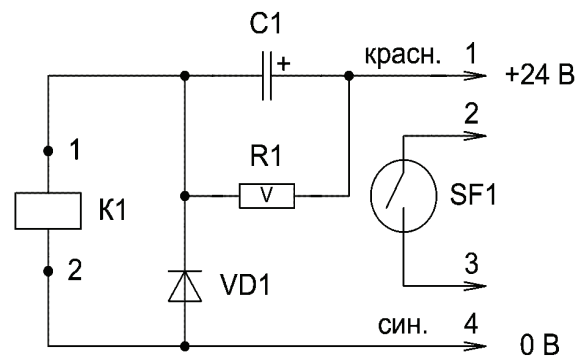


Рисунок 5 – Схема электрическая принципиальная

В схеме применена форсировка включения электромагнита K1 (с номинальным напряжением обмотки 12 В) зарядным током емкости C1. После окончания заряда емкости C1 катушка электромагнита с помощью резистора R1 остается под напряжением 4 В, достаточным для удерживания штока во втянутом положении. При этом УБОП находится в закрытом состоянии. Ток потребления при этом составляет $0,2 \pm 0,05$ А. Диод VD1 предотвращает проникновение всплеска напряжения в питающую линию в момент выключения электромагнита. Наличие герконового реле SF1, срабатывающего при перемещении штока, на котором закреплен магнит 6 (см. рис. 2), обеспечи-

вает возможность фиксировать состояние устройства системой управления ОББ.

Конструкция устройства, несмотря на увеличенные габариты по сравнению с ранее применяемыми замками ЗБ-1М (для сравнения габаритов см. рис. 6), обеспечивает взаимозаменяемость замковых устройств, так как сохранены диаметр запирающего штока, его ход и посадочные размеры. УБОП легко устанавливается на неподвижной части механизма электрооборудования совмещением установочных размеров $\varnothing 5,5$ на корпусе устройства с соответствующими отверстиями при помощи двух винтов М5.

Габаритные размеры опытного образца № 5 не требуют изменения конструкции электрооборудования, на котором он устанавливается.

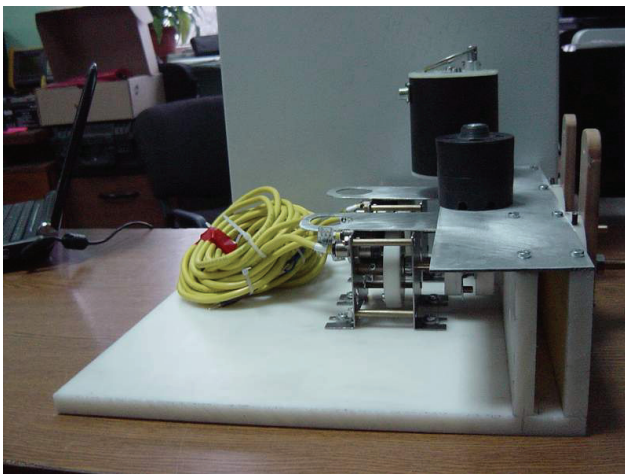


Рисунок 6 – Стенд испытательный с разных ракурсов

Если на конструкциях приводов нет отверстий для крепления УБОП и перемещения штока, их необходимо выполнить. На рис. 7 представлен эскиз разметки установочных отверстий на элементе неподвижной части привода электрооборудования.

Опытный образец № 5 прошел предварительные и приемочные испытания на испытательном стенде (см. рис. 6), показал надежность своей работы. Испытания опытного образца проводились в составе КЭО (см. рис. 8).

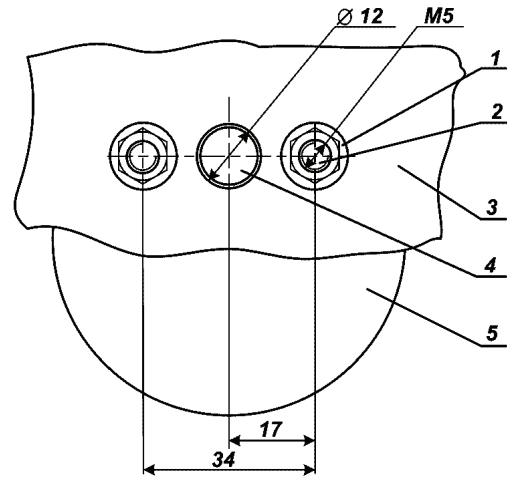


Рисунок 7 – Установка УБОП на неподвижной части привода электрооборудования: 1 – гайка М5 с шайбой, 2 – винты М5, 3 – неподвижная часть привода, 4 – шток, 5 – корпус УБОП

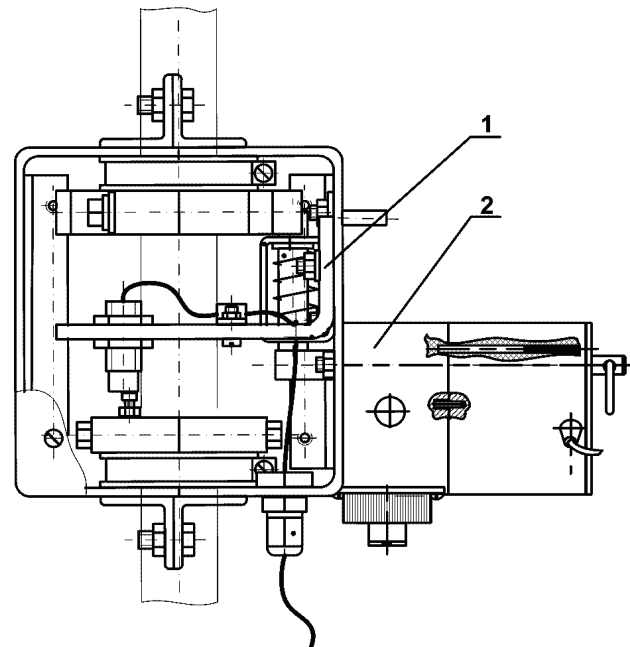


Рисунок 8 – Устройство блокировки УБ – 1: 1 – оборудование ОББ, 2 – опытный образец № 5

Выводы. В процессе НИОКР разработано, изготовлено и испытано устройство блокировки оперативных переключений, удовлетворяющее требованиям, предъявляемым к данной работе. Имеется возможность деблокирования устройства системой ОББ, используется низкое напряжение питания цепей УБОП (+24 В), потребляется малая мощность при неограниченном времени включения (4 Вт), имеется наличие кабельной связи с системой ОББ для передачи сигнала о состоянии устройства, удовлетворяются требования по взаимозаменяемости, ремонтпригодности, надежности, ограничиваются требования к квалификации обслуживающего персонала.

Представленная работа выполняется Национальным исследовательским университетом «МЭИ» (г. Москва) совместно с Национальным техническим

университетом «ХПИ» (г. Харьков).

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы: 1. Инструкция по эксплуатации оперативных блокировок безопасности в распределительных устройствах высокого напряжения. РД 34.35.512. Союзгехэнерго, 1979 г. 2. *О. П. Лобак, Г. Г. Семенов* Управление разъединителями, сигнализация и блокировки. – М.: Энергия, 1978. 3. Порядок организации оперативной блокировки на подстанциях нового поколения. Приложение к распоряжению ОАО "ФСК ЕЭС" №236р от 05.05.2010. – Москва. 4. ГОСТ 23660-79 – Система технического обслуживания и ремонта техники. 5. Устройство блокировки оперативных переключений (УБОП) комплекса электрооборудования нового поколения / *Г. М. Колюшко, О. С. Недзельский, Е. Г. Понуждаева, Р. К. Борисов, С. И. Хренов, Д. И. Ковалев* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1067). – С. 66-71. 6. Конструкция и термодинамические показатели опытного образца устройства блокировки оперативных переключений УБОП / *Г. М. Колюшко, О. С. Недзельский, Е. Г. Понуждаева, А. В. Пlichко, Д. И. Ковалев* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 109-114. 7. Анализ конструкций опытных образцов устройства блокировки оперативных переключений / *Г. М. Колюшко, О. С. Недзельский, Е. Г. Понуждаева, Р. К. Борисов, Д. И. Кова-*

лев // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ "ХПІ"; 2015. – №20 (1129). – С. 43-49.

Bibliography (transliterated): 1. Instruksiya po ekspluatatsii operativnykh blokirovok bezopasnosti v raspredelitelnykh ustroystvakh vyisokogo napryazheniya. RD 34.35.512. Soyuzghehenergo, 1979 Print. 2. *O. P. Lobak, G. G. Semenov* Upravlenie raz'edinitelyami, signalizatsiya i blokirovki. Moscow: Energiya, 1978 Print. 3. Poryadok organizatsii operativnoy blokirovki na podstantsiyah novogo pokoleniya. Prilozhenie k rasporyazheniyu OAO "FSK EES" No 236r ot 05.05.2010. – Moscow: Print. 4. GOST 23660-79 – Sistema tehniceskogo obsluzhivaniya i remonta tehniki Print. 5. Ustroystvo blokirovki operativnykh pereklyucheniy (UBOP) kompleksa elektrooborudovaniya novogo pokoleniya. *G. M. Koliushko, O. S. Nedzelskiy, E. G. Ponuzhdaeva, R. K. Borisov, S. I. Hrenov, D. I. Kovalev*. Visnik NTU "HPI". Seriya: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "HPI", 2014. No 21 (1067). 66-71 Print. 6. Konstruktsiya i termodinamicheskie pokazateli opyitnogo obraztsa ustroystva blokirovki operativnykh pereklyucheniy UBOP. *G. M. Koliushko, O. S. Nedzelskiy, E. G. Ponuzhdaeva, A. V. Plichko, D. I. Kovalev*. Visnik NTU "HPI". Seriya: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "HPI"; 2014. No 50 (1092). 109-114 Print. 7. Analiz konstruktsiy opyitnykh obraztsov ustroystva blokirovki operativnykh pereklyucheniy. *G. M. Koliushko, O. S. Nedzelskiy, E. G. Ponuzhdayeva, R. K. Borisov, D. I. Kovalev*. Visnik NTU "HPI". Seriya: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "HPI", 2015. No 20 (1129). 43-49 Print.

Поступила (received) 27.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Борисов Руслан Константинович – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский институт «МЭИ», ведущий научный сотрудник кафедры техники и электрофизики высоких напряжений, Россия, г. Москва тел.: 007 (903) 184 69 19; e-mail: kovalevdi@list.ru.

Borisov Ruslan Konstantinovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Federal employment budgetary educational institution higher education, National Research university «MEI», principal scientist sub department high voltage technics and electrophysics, tel.: 007 (903) 184 69 19; e-mail: kovalevdi@list.ru.

Ковалев Дмитрий Игоревич – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский институт «МЭИ», старший преподаватель кафедры техники и электрофизики высоких напряжений Россия, г. Москва, тел.: 007 (903) 184 69 19; e-mail: kovalevdi@list.ru.

Kovalev Dmitriy Igorevich – Federal employment budgetary educational institution higher education, National Research university «MEI», senior lecturer sub department high voltage technics and electrophysics, tel.: 007 (903) 184 69 19; e-mail: kovalevdi@list.ru.

Колюшко Георгий Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», ведущий научный сотрудник, тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Koliushko Georgiy Mykchailovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior staff scientist, Research and Design Institute «Molniya» National Technical University «KhPI», principal scientist, tel.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Недзельский Олег Саввич – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», ведущий инженер, тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Nedzelskiy Oleg Savvyuch – Research and Design Institute «Molniya» National Technical University «KhPI», principal engineer, tel.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Понуждаева Елена Геннадьевна – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», зав. лабораторией, тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Ponuzhdayeva Helena Gennad'evna – Research and Design Institute «Molniya» National Technical University «KhPI», laboratory manager, tel.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

УДК 621.317

**О. Ю. ГЛЕБОВ, С. В. КИПРИЧ, Д. Г. КОЛИУШКО, Г. М. КОЛИУШКО, А. В. ПЛИЧКО,
О. Л. РЕЗИНКИН**

ДИАГНОСТИКА ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

На основании назначения и состава заземляющего устройства и системы молниезащиты показано основное правило обеспечения электробезопасности. Перечислены недостатки заземляющих устройств, систем молниезащиты и кабельных сооружений. Сформулировано основное правило обеспечения электромагнитной совместимости технических средств, применяемых на электроэнергетических объектах. Приведен перечень испытаний технических средств на устойчивость к нормированным электромагнитным воздействиям. Сформулирован состав работ по диагностике заземляющего устройства и системы молниезащиты, по определению показателей электромагнитной обстановки на действующих объектах. Приведены основные рекомендации по ремонту заземляющих устройств и обеспечению электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: электробезопасность, заземляющее устройство, напряжение прикосновения, система молниезащиты, электромагнитная совместимость, электромагнитная обстановка.

Введение. Назначение заземляющего устройства (ЗУ) сформулировано в п.1.7.59 ПУЭ:2014. ЗУ в течение всего периода эксплуатации должно соответствовать всем требованиям к заземлению электроустановок: защите людей от поражения электрическим током при повреждении изоляции; условиям режимов работы электрических сетей; защиты электрооборудования от перенапряжений; электромагнитной совместимости компьютерных и микропроцессорных систем РЗА и АСУ ТП. ЗУ электроустановок зданий и сооружений и ЗУ для их молниезащиты, как правило, должны быть общими.

Поэтому на современном этапе диагностика состояния ЗУ является одной из частей более общей работы: обеспечение электробезопасности обслуживающего персонала и электромагнитной совместимости технических средств электроэнергетических объектов.

Определение термина *электробезопасность* приведено в межгосударственном стандарте ГОСТ 12.1.009-2003 [1]. *Электробезопасность* – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества. Согласно п. 1.7.3 ПУЭ:2006 *электробезопасность* – отсутствие угрозы со стороны электроустановки жизни, здоровью и имуществу людей, животным, растениям и окружающей среде, превышающей допустимый риск. В ПУЭ:2014 термин *электробезопасность* уже отсутствует.

Основное правило обеспечения электробезопасности четко сформулировано в п. 1.7.54 ПУЭ:2014. Токоведущие части электроустановки не должны быть доступными для случайного прямого прикосновения к ним, а доступные для прикосновения открытые и сторонние проводящие части не должны находиться под напряжением, представляющим опасность поражения током, как в нормальном режиме работы электроустановки, так и в случае повреждения изоляции. Из этого правила следует, что единственным параметром, характеризующим электробезопасность, является напряжение прикосновения.

Определение термина *электромагнитная совместимость* (ЭМС) приведено в стандарте Украины ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 [2]. ЭМС – способность технического средства (ТС) нормально (устойчиво) функционировать в окружающей электромагнитной среде (обстановке), не создавая помех для любого другого технического средства, функционирующего в этой среде (обстановке).

С термином ЭМС непосредственно связано два термина: электромагнитная устойчивость ТС и электромагнитная обстановка. Без определения этих терминов невозможно сформулировать основное правило обеспечения ЭМС.

Электромагнитная обстановка (ЭМО) – совокупность электромагнитных явлений в данной области пространства. ЭМО характеризуется некоторым набором показателей электромагнитных явлений, воздействующих на ТС в месте его установки.

Электромагнитная устойчивость (уровень помехоустойчивости) – максимальный уровень данного электромагнитного явления, воздействующего на ТС, при котором последнее способно функционировать нормально.

Основное правило обеспечения ЭМС следует из определения приведенных выше терминов. Показатели ЭМО не должны превышать параметров электромагнитной устойчивости технического средства, работающего в данной ЭМО. Для согласования этих параметров введены нормированные значения для каждого электромагнитного явления. При этом электромагнитную устойчивость ТС к нормированным воздействиям должны обеспечить производители этих ТС и подтвердить это в ходе сертификационных испытаний, а нормированные показатели ЭМО в местах установки ТС должны обеспечить потребители этих ТС, то есть собственники электроэнергетических объектов. В процессе исследования определяются показатели ЭМО, которые затем сопоставляются с параметрами электромагнитной устойчивости и, при необходимости, разрабатываются рекомендации по обеспечению ЭМС.

Таким образом, обеспечение электробезопасности и ЭМС на электроэнергетических объектах в об-

щем случае включает следующие этапы:

- 1) испытания ТС на устойчивость к нормированным воздействиям;
- 2) диагностика состояния заземляющего устройства (ЗУ);
- 3) диагностика состояния системы молниезащиты (СМЗ);
- 4) ревизия кабельных сооружений и мест заделки кабелей;
- 5) исследование электромагнитной обстановки (ЭМО);
- 6) разработка и выполнение рекомендаций.

Этап 1. Испытания ТС на устойчивость к нормированным электромагнитным воздействиям выполняются согласно стандартам серии ДСТУ ІЕС 61000-4-XX [3]. ТС подвергаются воздействию электромагнитных явлений, форма и амплитуда которых имеют заданные (нормированные) значения. Эти значения, характеризующие степень жесткости испытаний, должны быть не менее нормированных значений показателей ЭМО, приведенных в стандарте ДСТУ ІЕС 61000-2-5 [4], в котором электроэнергетические объекты отнесены к пятому классу: тяжелая промышленность, электрические станции и подстанции.

Стандарты серии ДСТУ ІЕС 61000-4-XX в общем случае предусматривают проведение двадцати видов испытаний ТС на устойчивость к электромагнитным воздействиям. Однако, ТС, применяемые на электроэнергетических объектах, подвергаются не всем, а лишь следующим одиннадцати видам:

- 1) к электростатическим разрядам (61000-4-2);
- 2) к излучаемому радиочастотному э/м полю (61000-4-3);
- 3) к наносекундным импульсным помехам

(61000-4-4);

4) к микросекундным импульсным помехам большой энергии (61000-4-5);

5) к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными э/м полями (61000-4-6);

6) к магнитному полю промышленной частоты (61000-4-8);

7) к провалам, коротким прерываниям и изменениям напряжения (61000-4-11);

8) к колебательным помехам (61000-4-12);

9) к несимметричным напряжениям кондуктивных помех в полосе частот от 0 до 150 кГц (61000-4-16);

10) к пульсациям напряжения электропитания постоянного тока (61000-4-17);

11) к провалам, коротким прерываниям и изменениям напряжения, воздействующим на входной порт сети электропитания постоянного тока (61000-4-29).

Кроме испытаний ТС на помехоустойчивость, необходимо также проводить испытания ТС на помехозащищенность, которые выполняются согласно стандарту ДСТУ ІЕС 61000-6-4 [5].

При проведении испытаний на устойчивость воздействия прикладывают к различным портам ТС. Различают пять типов портов: порт электропитания переменного тока; порт электропитания постоянного тока; сигнальные порты (порты подключения вторичных цепей измерительных трансформаторов тока и напряжения, высокочастотной связи, цепей сигнализации и управления); порт корпуса; порт функционального заземления. Для каждого порта предусмотрен соответствующий набор испытаний (см. рис. 1). Наибольшему количеству испытаний подвергается порт электропитания постоянного тока.



Рисунок 1 – Испытание портов ТС на помехоустойчивость

Оценка качества функционирования ТС при испытаниях на помехоустойчивость выполняется в общем случае по четырем критериям: критерий А – нормальное функционирование, при котором параметры ТС соответствуют техническим условиям; критерий В – кратковременное нарушение функционирования или ухудшение параметров ТС с последующим восстановлением нормального функционирования без вмеша-

тельства оператора; критерий С – нарушение функционирования или ухудшение параметров ТС, требующее вмешательства оператора для восстановления нормального функционирования; критерий D – нарушение функционирования или ухудшение параметров ТС, требующее ремонта из-за выхода из строя оборудования или компонентов. При этом для ТС, используемых на электроэнергетических объектах, применя-

ется в основном критерий А, и лишь в некоторых случаях – критерий В.

Специализированные сертификационные лаборатории НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (г. Харьков) укомплектованы всем необходимым испытательным и измерительным оборудованием для проведения полного перечня испытаний ТС на помехоэмиссию и на устойчивость к нормированным электромагнитным воздействиям.

Этап 2. Диагностика состояния заземляющего устройства (ЗУ) выполняется для проверки его соответствия требованиям ПУЭ. Заземляющее устройство (согласно п. 1.7.21 ПУЭ:2014) – совокупность электрически соединенных между собой заземлителей и заземляющих проводников, включая элементы их соединения.

Диагностика состояния ЗУ выполняется в соответствии с типовой инструкцией СОУ 31.2–21677681–19:2009 [6], которая предусматривает следующие виды работ:

- 1) проверка конструктивного исполнения ЗУ:
 - определение реального расположения искусственных и естественных заземлителей;
 - определение глубины прокладки горизонтальных заземлителей;
 - проверка наличия соединений в местах пересечения продольных и поперечных горизонтальных заземлителей;
 - определение путей растекания токов с оборудования при коротких замыканиях (КЗ);
- 2) проверка соединений заземляемых элементов и естественных заземлителей с ЗУ;
- 3) измерение сопротивления ЗУ;
- 4) измерение напряжения прикосновения;
- 5) проверка напряжения на ЗУ;
- 6) проверка коррозионного состояния элементов ЗУ;
- 7) измерение удельного сопротивления грунта.

В период с 1997 по 2014 гг. сотрудниками НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» совместно с ООО «НПП Каскад» (г. Днепропетровск) выполнена проверка ЗУ более 1000 объектов. Среди них все четыре ныне действующие атомные электростанции, около полутора десятка тепловых электростанций, три гидроэлектростанции Днепропетровского каскада, около 850 подстанций 35–750 кВ, газокomppressorные и нефтеперекачивающие станции, установки связи, а также здания и сооружения промышленного и иного назначения.

На рис. 2 приведены примеры исполнительных схем ЗУ двух подстанций 35/10 кВ одной из энергокомпаний Украины. Очевидно, что ЗУ одной из подстанций значительно хуже, чем ЗУ другой.

К основным недостаткам ЗУ можно отнести следующие: не вся территория ОРУ занята сеткой ЗУ; расстояние от оборудования до заземлителя не редко превышает 1,5 м; отсутствуют соединения продольных и поперечных горизонтальных заземлителей в местах их пересечения; здания главного щита управления (ГЩУ) не имеет внешнего контура заземления, а связь внутреннего контура (системы уравнивания

потенциалов) с ЗУ осуществляется по заземленным с двух сторон проводящим частям кабелей различного назначения (защитные и экранирующие оболочки силовых и контрольных кабелей, PEN проводники кабелей 0,4 кВ сети собственных нужд), металлоконструкциям кабельных сооружений, проводящим частям бытовых и технологических инженерных коммуникаций (коммунальный водопровод, воздухопровод, пожарный водопровод, маслопровод); при расположении ГЩУ между двух ОРУ разных классов напряжения отсутствует необходимое количество связей (должно быть не менее четырех), в том числе проложенных в непосредственной близости от ГЩУ (должно быть две); трансформаторы (автотрансформаторы) и их нейтрали связаны с ЗУ только по заземленным с двух сторон проводящим частям кабелей различного назначения, трубам пожаротушения, рельсам,

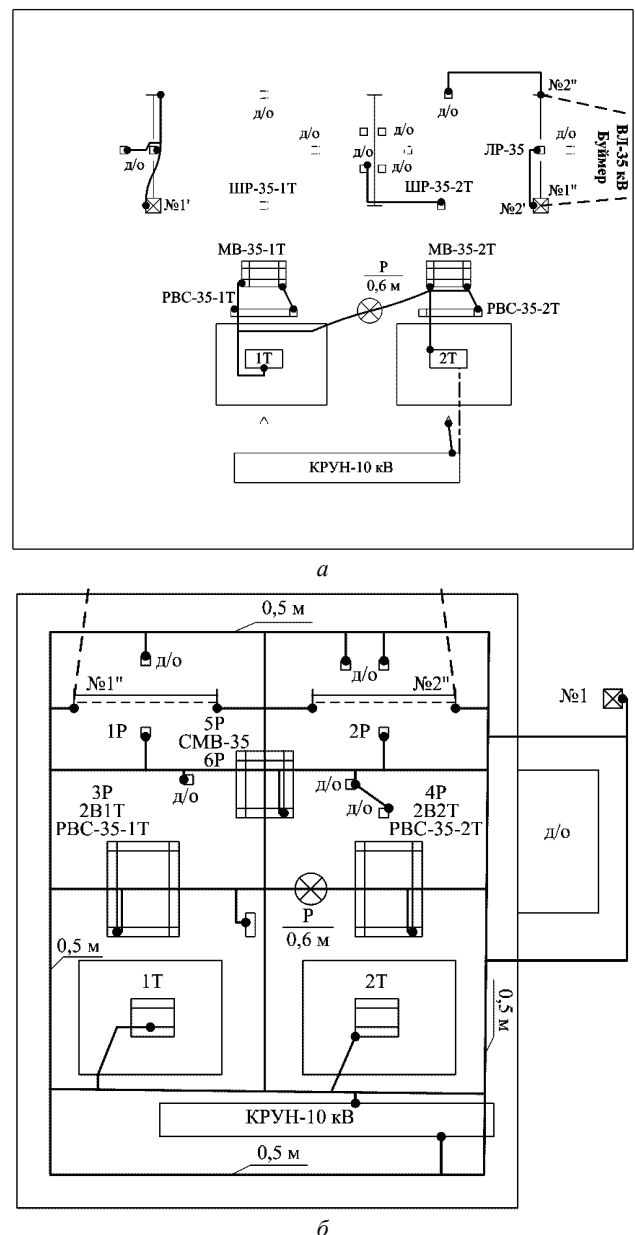


Рисунок 2 – Исполнительные схемы ЗУ подстанций 35/10 кВ: а – ЗУ не пригодно к эксплуатации; б – ЗУ пригодно к эксплуатации

металлоконструкциям портала, что не обеспечивает должного отвода токов в грунт; у разъединителей не заземлены механизмы ручных приводов; у воздушных выключателей в случае аварии большая часть аварийного тока (от 50 до 90 %) может растекаться по воздухопроводу высокого давления (20 атм.) и заземленным с двух сторон проводящим частям кабелей; шкафы управления разъединителями соединяются с ЗУ по заземленным с двух сторон проводящим частям силовых и контрольных кабелей; – металлические ограды вокруг элементов ОРУ (трансформаторов собственных нужд, разрядников, ОПН, КС и др.) не заземлены; выявляются группы оборудования, которые связаны между собой, но связи с общим ЗУ не имеют.

По результатам измерений и проверок составляются соответствующие протоколы, которые заносят в паспорт ЗУ электроустановки, и делается заключение о пригодности ЗУ к эксплуатации, а в случае необходимости разрабатываются рекомендации для проведения ремонтно-восстановительных работ.

Рекомендации по ремонту ЗУ разрабатываются индивидуально для каждого объекта на основании математического моделирования режимов короткого замыкания на шинах ОРУ, в ходе которого рассчитываются значения напряжения прикосновения и другие контролируемые параметры ЗУ. Общими рекомендациями являются следующие: если значение сопротивления ЗУ превышает допустимое, следует подключить к ЗУ все проводящие части и естественные заземлители (грозозащитные тросы ВЛ, рельсовые пути, артезианские скважины, водопровод и т. д.), а также проложить за территорией объекта лучевые заземлители для увеличения площади ЗУ; если значение напряжения

прикосновения превышает допустимое, следует на рабочих местах уложить изолирующий слой (щебень, безарматурные бетонные плиты или асфальтовое покрытие) толщиной 10–30 см; если обнаружен значительный коррозионный износ, следует заменить поврежденные заземлители, при необходимости увеличить их сечение, и на переходе «земля – воздух» защитить заземляющие проводники антикоррозионным покрытием; если обнаружено нарушение связей между заземлителями, соединяющими, например, распределительными разными классами напряжения, следует проложить дополнительные заземлители необходимого сечения.

Этап 3. Диагностика состояния системы молниезащиты (СМЗ) выполняется для проверки ее соответствия требованиям ПУЭ, а также ДСТУ Б В.2.5–38:2008 [7] или ДСТУ EN 62305-3:2012 [8]. *Молниезащита* – комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на защиту объекта от воздействия прямого удара молнии, вторичных ее проявлений и заноса высоких потенциалов.

Защиту объекта от прямого удара выполняет внешняя система молниезащиты (СМЗ), которая представляет собой совокупность электрически соединенных между собой систем молниеприемников, токоотводов и заземлителей (см. рис. 2).

Защиту объекта от вторичных проявлений молнии и заноса высоких потенциалов выполняет внутренняя СМЗ, которая представляет собой совокупность электрически соединенных между собой систем уравнивания потенциалов, экранирования и устройств защиты от импульсных помех (УЗИП) (см. рис. 3).



Рисунок 3 – Система молниезащиты

Диагностика состояния СМЗ предусматривает следующий состав работ:

1) идентификация объекта защиты: определение характеристик объекта защиты; топология объекта защиты и объектов вблизи него; определение высот элементов объекта, выступающих над кровлей; определение параметров окружающей среды; определение уровня молниезащиты;

2) диагностика состояния внешней СМЗ:

а) определение состояния системы молниеприемников: тип применяемых молниеприемников, их топология, сечение, электрическая непрерывность; пути растекания тока при ударе молнии; распределение потенциалов на поверхности земли вблизи молниеотводов при растекании импульсного тока (шаго-

вое напряжение); коррозионное состояние; расчет зон защиты;

б) определение состояния системы токоотводов: тип применяемых токоотводов, их топология, сечение, электрическая непрерывность; напряжение прикосновения; коррозионное состояние;

в) определение состояния системы заземлителей: тип применяемых заземлителей, их топология, сечение, электрическая непрерывность; электрическое сопротивление переменному току промышленной частоты и импульсному току; состояние системы выравнивания потенциалов перед входами и въездами в здания и сооружения; удельное сопротивление грунта; коррозионное состояние;

3) диагностика состояния внутренней СМЗ:

а) определение состояния системы уравнивания потенциалов: тип применяемых шин и проводников, их топология, сечение, электрическая непрерывность; сопротивление связи шины уравнивания потенциалов с заземлителем; сопротивление связи проводящих частей с шиной уравнивания потенциалов; проверка мест ввода наземных (надземных) и подземных металлических коммуникаций в здания и сооружения; коррозионное состояние;

б) определение состояния системы экранирования: тип применяемых экранов, их топология, сечение, электрическая непрерывность; коррозионное состояние;

в) определение состояния системы УЗИП: тип применяемых УЗИП; место установки; параметры работоспособности; напряжения электромагнитных помех в защищаемых кабелях при имитации разряда молнии в систему молниеприемников.

Основные недостатки выполнения СМЗ, основанные на опыте обследования подстанций 35–750 кВ, зданий и сооружений промышленного и иного назначения можно сформулировать следующим образом: отсутствуют вертикальные заземлители; не обеспечивается требуемое растекание тока молнии по магистралям заземления от молниеотводов; молниеотвод присоединен заземляющим проводником к проводящим частям кабельного канала; молниеотвод присоединен заземляющим проводником к внешней ограде; молниеотвод присоединен к системе уравнивания потенциалов здания, когда в этом отсутствует необходимость; молниеприемники, установленные на крыше здания, имеют недостаточное количество или не имеют вообще необходимых искусственных горизонтальных и (или) вертикальных заземлителей; значительный коррозионный износ молниеприемников и токоотводов; токоотводы от сеточного молниеприемника проложены к заземлителям по периметру здания реже, чем требуется; по периметру здания, на крыше которого установлен сеточный молниеприемник, отсутствует наружный контур заземления; сечение молниеприемников и/или токоотводов меньше требуемого; металлические конструкции на крыше здания не присоединены к сеточному молниеприемнику, а неметаллические – не оборудованы стержневыми молниеприемниками; кабельные линии осветительного оборудования и оборудования связи, установленного на отдельно стоящих молниеотводах, использующихся в качестве мачт освещения или радиомачт, проложены не в металлических трубах, не редко указанные кабели вводятся в здание не в земле, а на уровне 2–5 м.

Указанные нарушения не только снижают надежность молниезащиты объекта и безопасность обслуживающего персонала, но также приводят к появлению опасных значений напряжений электромагнитных помех, способных вывести из строя оборудование систем релейной защиты, автоматики и телемеханики, к прорыву импульсного тока молнии внутрь здания и его дальнейшему растеканию по кабельным линиям ВЧ связи, компьютерных сетей, электропроводки, пожарной и охранной сигнализации и другим инженерным системам.

Этап 4. Ревизия кабельных сооружений и мест концевой заделки кабелей в общем случае может включать следующие виды работ: определение типа и топологии кабельных сооружений; проверка целостности металлической конструкции или шины уравнивания потенциалов (ШУП); проверка целостности защитных и экранирующих оболочек кабелей непосредственно в кабельном сооружении и в местах концевой заделки кабелей; проверка присоединения к ЗУ защитных и экранирующих оболочек кабелей в местах их концевой заделки; экспериментальное или расчетное определение коэффициентов ослабления кабельными сооружениями микросекундных импульсных однополярных и колебательных затухающих помех.

Наиболее распространенными на электроэнергетических объектах Украины кабельными сооружениями являются железобетонные кабельные лотки и каналы. Значительно реже используют металлические короба, эстакады и железобетонные туннели. Недостатком применения лотков является отсутствие цельной металлоконструкции и неупорядоченная укладка кабельных линий различного назначения и класса напряжения. Кабельные каналы, как правило, имеют металлоконструкцию с кронштейнами, поддерживающими кабельную продукцию, но ее целостность зачастую вызывает сомнения вследствие коррозии. В канале кабельные линии разных классов напряжения разделены в пространстве, но зачастую на недостаточное расстояние. Металлические короба и железобетонные туннели, по причине ограниченного доступа в них атмосферных осадков, лишены недостатков, присущих лоткам и каналам, но, вследствие большой стоимости, применяются в электроустановках классов напряжения 500 кВ и выше. При этом кабельные туннели требуют проведения соответствующего обслуживания.

Основные недостатки, выявленные при обследовании кабельных сооружений подстанций различного класса напряжений, можно сформулировать следующим образом: железобетонные или кирпичные кабельные каналы имеют обваленные стены, значительный коррозионный износ металлических несущих конструкций и шунтирующих проводников (вплоть до полного разрушения); разрушение плит – перекрытий; «замуливание» кабельных линий; кабельные линии разного класса напряжения и назначения расположены «в навал»; защитные оболочки кабельных линий разрушены вследствие коррозии; в кабельных каналах некоторых объектов «стоит» вода; расположение кабельных каналов не отвечает требованиям ЭМС; металлические оболочки кабельных линий не заземлены на вводе в здание.

Этап 5. Исследование электромагнитной обстановки (ЭМО) выполняется для проверки ее соответствия требованиям ДСТУ ІЕС 61000-2-5 [4]. Источники электромагнитных помех можно условно разделить на две части – естественного и искусственного происхождения, каждая из которых состоит из трех групп (см. рис. 4). Сведения о помехах, их источниках и причинах возникновения приведены в стандарте

ДСТУ ІЕС 61000-6-5 [10].

Сотрудниками НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» совместно с сотрудниками ДонОРГРЭС разработан проект инструкции «Определение электромагнитной обстановки в электроустановках 110–330 кВ». Инструкция предусматривает определение показателей ЭМО как в установившихся и переходных режимах работы объекта, так и при имитации аварийных режимов и мощных редко повторяющихся природных явлений, таких как удар молнии. Определяемые показатели, общее количество которых равно 43, характеризуют следующие электромагнитные воздействия: на-

пряжения в низковольтных силовых сетях; несинусоидальность напряжения низковольтных силовых сетей; сигнальные напряжения в низковольтных силовых сетях; низкочастотные напряжения в сигнальных и контрольных кабелях; низкочастотное магнитное поле; низкочастотное электрическое поле; высокочастотные незатухающие колебания; высокочастотные однонаправленные переходные процессы; высокочастотные колебательные переходные процессы; высокочастотные колебательные электромагнитные поля; высокочастотные импульсные электромагнитные поля; электростатические разряды.



Рисунок 4 – Классификация источников электромагнитных помех

Этап 6. Рекомендации по обеспечению ЭМС ТС. Электромагнитные помехи обусловлены, в общем случае, наличием источника и приемника помех, а также связи (гальванической и/или электромагнитной) между ними. Таким образом, обеспечение ЭМС достигается ослаблением помех либо в источнике, либо в приемнике, либо ослаблением соответствующей связи между источником и приемником [11].

Ослабление помех в источнике достигается, как правило, выполнением организационных мероприятий: запрет или ограничение использования источников помех радиочастотного диапазона, например, переносных радиостанций и др.; контроль климатических условий в помещениях с оборудованием вторичных цепей с целью уменьшения электростатических потенциалов, а также использование обслуживающим персоналом средств защиты от статического электричества, отвечающих требованиям ГОСТ 12.4.124-83.

Ослабление помех в приемнике достигается установкой входных фильтров, оптронных развязок, а также устройств защиты от импульсных помех

(УЗИП) на основе варисторов и др.

Мероприятия по ослаблению гальванической связи:

– шунтирование кабельных линий вторичных цепей (выполнение равномерной сетки ЗУ на всей территории ПС), то есть уменьшение сопротивления между теми точками ЗУ, к которым присоединены заземляемые проводники и/или оболочки кабельных линий вторичных цепей. При этом уменьшается доля тока замыкания на землю или тока молнии, ответвляемая в заземляемые проводники и/или оболочки кабельных линий;

– уменьшение сопротивления ЗУ (увеличение площади, занимаемой сеткой ЗУ). При этом уменьшается величина потенциала на заземлителе, обусловленная стеканием с него тока замыкания на землю или тока молнии, и, следовательно, напряжение помехи, вызванное резким увеличением потенциала заземлителя.

Мероприятия по ослаблению электромагнитной связи:

– разнесение в пространстве источника и приемника помех, то есть увеличение расстояния между

ними. При этом уменьшается напряженность электрического и магнитного поля, воздействующая на приемник помех (например, кабельную линию), и, следовательно, наводимые напряжения помех;

– экранирование приемника помех (например, кабельной линии).

Выводы.

1. Опыт диагностики заземляющих устройств, систем молниезащиты и электромагнитной обстановки, а также ревизии кабельных сооружений различных объектов показывает, что существует значительное количество недостатков, снижающих уровень электробезопасности и электромагнитной совместимости этих объектов.

2. Предложенная концепция обеспечения электробезопасности и электромагнитной совместимости состоит из шести основных этапов, выполнение которых в четко определенной последовательности позволяет выявить недостатки и минимизировать затраты на реконструкцию заземляющих устройств, систем молниезащиты и уменьшение влияния электромагнитных воздействий естественного и искусственного происхождения.

Список литературы: 1. ГОСТ 12.1.009-2003 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Термины и определения. 2. ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 Словник електротехнічних термінів. Глава 161. Електромагнітна сумісність. 3. ДСТУ ІЕС 61000-4-XX:2012 Совместимость технических средств электромагнитная. Часть 4. Методы испытаний и измерений. Раздел XX – Серия стандартов. 4. ДСТУ ІЕС 61000-2-5 Совместимость технических средств электромагнитная. Часть 2. Электромагнитная обстановка. Раздел 5. Классификация электромагнитных обстановок. 5. ДСТУ ІЕС 61000-6-4:2012 Совместимость технических средств электромагнитная. Часть 6. Общие стандарты. Раздел 4. Помехоэмиссия от устройств, применяемых в промышленных зонах. 6. СОУ 31.2-21677681-

19:2009 Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. 7. ДСТУ Б В.2.5-38:2008 Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд. 8. ДСТУ EN 62305-3:2012 Захист від блискавки. Частина 3. Фізичні руйнування споруд та безпека для життя людей. 9. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования. 10. ДСТУ ІЕС 61000-6-5 Совместимость технических средств электромагнитная. Часть 6. Общие стандарты. Раздел 5: Помехоустойчивость технических средств, применяемых на электрических станциях и подстанциях. 11. Дьяков А. Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А. Ф. Дьяков, Б. К. Максимов, Р. К. Борисов, И. П. Кузечкин, А. В. Жуков. Под редакцией А. Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.

Bibliography (transliterated): 1. GOST 12.1.009-2003 Sistema standartov bezopasnosti truda. Jelektrobezopasnost'. Terminy i opredelenija. Print. 2. DSTU IEC 60050-161:2003 Slovnik elektrotehnicnih terminiv. Glava 161. Elektromagnitna sumisnist'. Print. 3. DSTU IEC 61000-4-XX:2012 Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Chast' 4. Metody ispytanij i izmerenij. Razdel XX – Serija standartov. Print. 4. DSTU IEC 61000-2-5 Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Chast' 2. Jelektromagnitnaja obstanovka. Razdel 5. Klassifikacija jelektromagnitnyh obstanovok. Print. 5. DSTU IEC 61000-6-4:2012 Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Chast' 6. Obshhie standarty. Razdel 4. Pomehoemissija ot ustrojstv, primenjaemyh v promyshlennyh zonah. Print. 6. SOU 31.2-21677681-19:2009 Viprobuvannja ta kontrol' pristroiv zazemlennja elektroustanovok. Tipova instrukcija. Print. 7. DSTU B V.2.5-38:2008 Inzhenerne obladnannya budinkiv i sporud. Ulashtuvannja bliskavkozahistu budivel' i sporud. Print. 8. DSTU EN 62305-3:2012 Zahist vid bliskavki. Chastina 3. Fizichni rujnuvannja sporud ta nebezpeka dlja zhittja ljudej. Print. 9. GOST 12.4.124-83 Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva zashhity ot staticheskogo jelektrichestva. Obshhie tehniceskije trebovanija. Print. 10. DSTU IEC 61000-6-5 Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Chast' 6. Obshhie standarty. Razdel 5: Pomehoustojchivost' tehniceskikh sredstv, primenjaemyh na jelektricheskikh stancijah i podstancijah. Print. 11. D'jakov A. F., Maksimov B. K., Borisov R. K., Kuzhekin I. P., Zhukov A. V. Jelektromagnitnaja sovmestimost' v jelektroenergetike i jelektrotehnikе. Pod redakciej A. F. D'jakova. Moscow: Jenergoatomizdat, 2003. 768. Print.

Поступила (received) 22.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Глебов Олег Юрьевич – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», старший научный сотрудник, тел.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Glyebov Oleg Yuriyovych – Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", senior staff scientist, tel.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Киприч Светлана Викторовна – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», научный сотрудник, тел.: (057) 707-62-80; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Kiprych Svitlana Viktorivna – Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", scientist, tel.: (057) 707-62-80; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Колушко Денис Георгиевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «ХПИ», старший научный сотрудник кафедры автоматизированных электромеханических систем, тел.: (057) 707-64-45; e-mail: den@kpi.kharkov.ua.

Koliushko Denys Georgiyovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior staff scientist, National Technical University "KhPI", senior staff scientist at the Department of Automatic electromechanical systems, tel.: (057) 707-64-45; e-mail: den@kpi.kharkov.ua.

Колушко Георгий Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», ведущий научный сотрудник, тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Koliushko Georgiy Mykchailovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior staff scientist, Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", principal scientist, tel.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Пличко Андрей Валерьевич – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», младший научный сотрудник, тел.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Plichko Andrii Valeriyovych – Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", junior scientist, tel.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Резинкин Олег Лукьянович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «ХПИ», заведующий кафедрой теоретических основ электротехники, тел.: (057) 707-66-42; e-mail: olegrezinkin@rambler.ru.

Rezinkin Oleg Luk'yanovych – Doctor of Technical Sciences, senior staff scientist, National Technical University "KhPI", head by the department of theoretical bases of the electrical engineering, tel.: (057) 707-66-42; e-mail: olegrezinkin@rambler.ru.

УДК 621.317

О. Ю. ГЛЕБОВ, С. В. КИПРИЧ, Д. Г. КОЛИУШКО, Г. М. КОЛИУШКО, М. М. РЕЗИНКИНА

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО МОЛНИЕЗАЩИТЕ ДСТУ EN 62305-X:2012

Представлен перевод с английского на украинский и русский языки терминов и определений международных стандартов IEC 62305-X:2010 по молниезащите. Общее количество терминов составляет 112 шт. Указаны несовпадения терминов и определений в различных частях международного стандарта. Предлагается заинтересованным специалистам и организациям принять участие в обсуждении, исправлении и дополнении предложенных формулировок. Указано, что действующие в Украине стандарты по молниезащите значительно отличаются друг от друга по форме и содержанию. Предложено отменить стандарт Украины ДСТУ Б В.2.5-38:2008.

Ключевые слова: стандарты по молниезащите, система молниезащиты внешняя и внутренняя, молниеприемники, токоотводы, заземлители, устройства защиты от всплесков.

Введение. На Ваше рассмотрение выносятся перевод на украинский и русский языки терминов и определений по молниезащите, которые применяются в международных стандартах серии IEC 62305-X:2010 [1–4], общий объем которых составляет 412 страниц. Эти стандарты были гармонизированы в Украине в 2012 г. методом «замены обложки» с добавлением «ДСТУ EN» вместо «IEC» в начале шифра. Авторы перевода предлагают всем заинтересованным специалистам и организациям принять участие в обсуждении, исправлении и дополнении изложенных ниже формулировок. Ваши замечания направляйте по адресу электронной почты [nio5_molniya@ukr.net].

Общее количество терминов составляет 112 шт. Некоторые термины используются в нескольких частях IEC 62305. Обращаем Ваше внимание на то, что для некоторых терминов и определений имеют место отличия формулировок на английском языке в разных частях IEC 62305. Для таких терминов и определений приведены формулировки из каждой части и с помощью подчеркивания выделены отличия. Обнаруженные различия не носят принципиального характера, однако, с юридической точки зрения, разночтений быть не должно. Если же англоязычные формулировки в разных частях IEC 62305 одинаковы, то приводится только одна формулировка.

Актуальность. Действующие в Украине в настоящее время стандарты по молниезащите (ДСТУ Б В.2.5-38:2008 [5] и ДСТУ EN 62305-X:2012) значительно отличаются друг от друга не только в части формулировки терминов и определений, но и по общему содержанию и по методам расчета зон защи-

ты, о чем авторы докладывали в 2014 г. (Науково-практична конференція «Експлуатація високовольтних електричних мереж, підстанцій та інших енергетичних об'єктів в період грозової активності та в умовах високих температур», 23–27 червня 2014 року, с. Славське, Львівської обл.) [6]. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность отмены одного из них, а именно ДСТУ Б В.2.5-38:2008, поскольку стандарты серии IEC 62305 гармонизированы в рамках программы Евроинтеграции. Если отмена ДСТУ Б В.2.5-38:2008 окажется не целесообразной с организационной точки зрения, поскольку на этот документ даны ссылки в других нормативных документах Украины (например, п. 4.2.162 ПУЕ:2014), то следует привести его к виду стандартов серии IEC 62305.

Полученные результаты.

1) IEC 62305-1:2010, 3.1

Lightning flash to earth – Electrical discharge of atmospheric origin between cloud and earth consisting of one or more strokes.

Спалах блискавки в землю – Електричний розряд атмосферного походження між хмарою та землею, що складається з одного або декількох ударів.

Вспышка молнии в землю – Электрический разряд атмосферного происхождения между облаком и землей, состоящий из одного или нескольких ударов.

2) IEC 62305-1:2010, 3.2

Downward flash – Lightning flash initiated by a downward leader from cloud to earth.

NOTE – A downward flash consists of a first impulse, which can be followed by subsequent impulses.

One or more impulses may be followed by a long stroke.

Низхідний спалах – Спалах блискавки, ініційований лідером, який є низхідним від хмари до землі.

ПРИМІТКА – Низхідний спалах включає в себе перший імпульс, який може супроводжуватися наступними імпульсами. Один або декілька імпульсів можуть супроводжуватися тривалим ударом.

Нисходящая вспышка – Вспышка молнии, инициированная лидером, нисходящим от облака к земле.

ПРИМЕЧАНИЕ – Нисходящая вспышка включает в себя первый импульс, который может сопровождаться последующими импульсами. Один или несколько импульсов могут сопровождаться долгим ударом.

3) IEC 62305-1:2010, 3.3

Upward flash – Lightning flash initiated by an upward leader from an earthed structure to cloud.

NOTE – An upward flash consists of a first long stroke with or without multiple superimposed impulses. One or more impulses may be followed by a long stroke.

Висхідний спалах – Спалах блискавки, ініційований лідером, який є висхідним від заземленого об'єкту до хмари.

ПРИМІТКА – Висхідний спалах включає в себе перший тривалий удар разом або без складених імпульсів. Один або декілька імпульсів можуть супроводжуватися тривалим ударом.

Восходящая вспышка – Вспышка молнии, инициированная лидером, восходящим от заземленного объекта к облаку.

ПРИМЕЧАНИЕ – Восходящая вспышка включает в себя первый долгий удар вместе или без составных импульсов. Один или несколько импульсов могут сопровождаться долгим ударом.

4) IEC 62305-1:2010, 3.4

Lightning stroke – Single electrical discharge in a lightning flash to earth.

Удар блискавки – Одиничний електричний розряд у розряді блискавки в землю.

Удар молнии – Единичный электрический разряд в разряде молнии в землю.

5) IEC 62305-1:2010, 3.5

Short stroke – Part of the lightning flash which corresponds to an impulse current.

NOTE – This current has a time T_2 to the half peak value on the tail typically less than 2 ms (see Fig. A.1).

Короткий удар – Частина спалаху блискавки, що відповідає імпульсному струму.

ПРИМІТКА – Тривалість напівспаду цього струму T_2 зазвичай менше, ніж 2 мс (див. рис. А.1).

Короткий удар – Часть вспышки молнии, соответствующая импульсному току.

ПРИМЕЧАНИЕ – Длительность полуспада этого тока T_2 обычно менее 2 мс (см. рис. А.1).

6) IEC 62305-1:2010, 3.6

Long stroke – Part of the lightning flash which corresponds to a continuing current.

NOTE – The duration time t_{LONG} (time from the 10 % value on the front to the 10 % value on the tail) of this continuing current is typically more than 2 ms and less than 1 s (see Fig. A.2).

Тривалий удар – Частина спалаху блискавки, що відповідає тривалому струму.

ПРИМІТКА – Тривалість T_{LONG} (час від 10 % значення на фронті до 10 % значення на спаді) цього тривалого струму зазвичай більше 2 мс і менше 1 с (див. рис. А.2).

Долгий удар – Часть вспышки молнии, соответствующая длительному току.

ПРИМЕЧАНИЕ – Длительность T_{LONG} (время от 10 % значения на фронте до 10 % значения на спаде) этого длительного тока обычно более 2 мс и менее 1 с (см. рис. А.2).

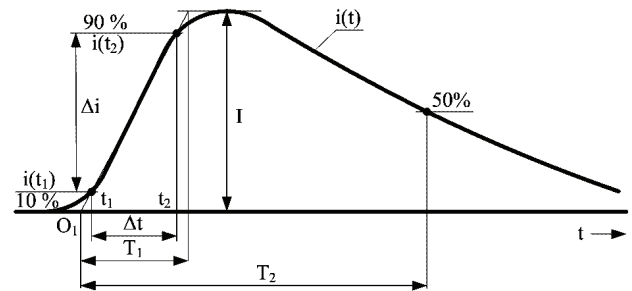


Figure A.1 – Definitions of impulse current parameters (typically $T_2 < 2$ ms): O_1 – virtual origin of impulse current; I – current peak value; T_1 – front time of impulse current; T_2 – time to half value of impulse current.

Рисунок А.1 – Визначення параметрів імпульсу струму (зазвичай $T_2 < 2$ мс): O_1 – розрахунковий початок імпульсу струму; I – пікове значення струму; T_1 – тривалість фронту імпульсу струму; T_2 – тривалість напівспаду імпульсу струму.

Рисунок А.1 – Определение параметров импульса тока (обычно $T_2 < 2$ мс): O_1 – расчетное начало импульса тока; I – пиковое значение тока; T_1 – длительность фронта импульса тока; T_2 – длительность полуспада импульса тока.

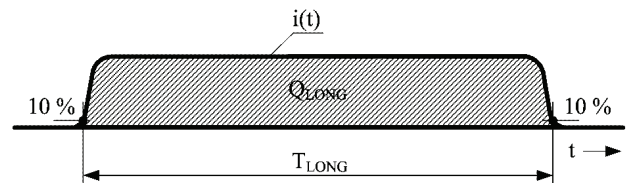


Figure A.2 – Definitions of long stroke parameters (typically $2 \text{ ms} < T_{LONG} < 1 \text{ s}$): T_{LONG} – duration of long stroke current; Q_{LONG} – long stroke charge.

Рисунок А.2 – Визначення параметрів тривалого удару (зазвичай $2 \text{ мс} < T_{LONG} < 1 \text{ с}$): T_{LONG} – тривалість струму тривалого удару; Q_{LONG} – заряд тривалого удару.

Рисунок А.2 – Определение параметров долгого удара (обычно $2 \text{ мс} < T_{LONG} < 1 \text{ с}$): T_{LONG} – длительность тока долгого удара; Q_{LONG} – заряд долгого удара.

7) IEC 62305-1:2010, 3.7

Multiple strokes – Lightning flash consisting on average of 3–4 strokes, with typical time interval between them of about 50 ms.

NOTE – Events having up to a few dozen strokes with intervals between them ranging from 10 ms to 250 ms have been reported.

Складені удари – Спалахи блискавки, що складаються в середньому з 3–4 ударів, інтервал між якими зазвичай становить близько 50 мс.

ПРИМІТКА – Були зареєстровані події, які мали аж до декількох дюжин ударів з інтервалом між ними у діапазоні від 10 мс до 250 мс.

Составные удары – Вспышки молнии, состоящие в среднем из 3–4 ударов, интервал между которыми обычно составляет около 50 мс.

ПРИМЕЧАНИЕ – Были зарегистрированы события, имеющие вплоть до нескольких дюжин ударов с интервалами между ними в диапазоне от 10 мс до 250 мс.

8) IEC 62305-1:2010, 3.8

Point of strike – Point where a lightning flash strikes the earth, or protruding structure (e.g. structure, LPS, line, tree, etc.).

NOTE – A lightning flash may have more than one point of strike.

Точка удара – Точка, де спалах блискавки ударяє у землю або в об'єкт, що виступає (наприклад, спорудження, СБЗ, лінія, дерево тощо).

ПРИМІТКА – Спалах блискавки може мати більше однієї точки удару.

Точка удара – Точка, где вспышка молнии ударяет в землю или выступающий объект (например, сооружение, СМЗ, линия, дерево и т.п.).

ПРИМЕЧАНИЕ – Вспышка молнии может иметь больше одной точки удара.

9) IEC 62305-1:2010, 3.9

Lightning current, (i) – Current flowing at the point of strike.

Струм блискавки, (i) – Струм, що протікає у точці удару.

Ток молнии, (i) – Ток, протекающий в точке удара.

10) IEC 62305-1:2010, 3.10

Current peak value, (I) – Maximum value of the lightning current.

Пікове значення струму, (I) – Максимальне значення струму блискавки.

Пиковое значение тока, (I) – Максимальное значение тока молнии.

11) IEC 62305-1:2010, 3.11

Average steepness of the front of impulse current – Average rate of change of current within a time interval $\Delta t = t_2 - t_1$.

NOTE – It is expressed by the difference $\Delta i = i(t_2) - i(t_1)$ of the values of the current at the start and at the end of this interval, divided by the time interval $\Delta t = t_2 - t_1$ (see Fig. A.1).

Середня крутість фронту імпульсу струму (швидкість наростання) – Середнє значення зміни струму блискавки на інтервалі часу $\Delta t = t_2 - t_1$.

ПРИМІТКА – Середня крутість фронту імпульсу струму дорівнює відношенню різниці значень струму блискавки $\Delta i = i(t_2) - i(t_1)$ на початку та наприкінці інтервалу Δt до тривалості цього інтервалу $\Delta t = t_2 - t_1$ (див. рис. А.1).

Средняя крутизна фронта импульса тока (скорость нарастания) – Среднее значение изменения тока молнии на интервале времени $\Delta t = t_2 - t_1$.

ПРИМЕЧАНИЕ – Средняя крутизна фронта импульса тока равна отношению разности значений тока

молнии $\Delta i = i(t_2) - i(t_1)$ в начале и в конце интервала Δt к длительности этого интервала $\Delta t = t_2 - t_1$ (см. рис. А.1).

12) IEC 62305-1:2010, 3.12

Front time of impulse current (T₁) – Virtual parameter defined as 1.25 times the time interval between the instants when the 10 % and 90 % of the peak value are reached (see Fig. A.1).

Тривалість фронту імпульсу струму (T₁) – Розрахунковий параметр, який визначається як помножена на 1,25 тривалість інтервалу часу між моментами, коли струм блискавки досягає 10 % і 90 % свого пікового значення (див. рис. А.1).

Длительность фронта импульса тока (T₁) – Расчетный параметр, определяемый как умноженная на 1,25 длительность интервала времени между моментами, когда ток молнии достигает 10 % и 90 % своего пикового значения (см. рис. А.1).

13) IEC 62305-1:2010, 3.13

Virtual origin of impulse current (O₁) – Point of intersection with time axis of a straight line drawn through the 10 % and the 90 % reference points on the stroke current front (see Fig. A.1); it precedes by 0.1 T₁ that instant at which the current attains 10% of its peak value.

Розрахунковий початок імпульсу струму (O₁) – Точка перетину з віссю часу прямої лінії, що проходить через точки 10 % і 90 % на фронті імпульсу струму (див. рис. А.1); вона на 0,1 T₁ передуює моменту, у якому струм блискавки досягає 10 % свого пікового значення.

Расчетное начало импульса тока (O₁) – Точка пересечения с осью времени прямой линии, проведенной через точки 10 % и 90 % на фронте импульса тока (см. рис. А.1); она на 0,1 T₁ предшествует моменту, в котором ток молнии достигает 10 % от своего пикового значения.

14) IEC 62305-1:2010, 3.14

Time to half value of impulse current (T₂) – Virtual parameter defined as the time interval between the virtual origin O₁ and the instant at which the current has decreased to half the peak value on the tail (see Fig. A.1).

Тривалість напівспаду імпульсу струму (T₂) – Розрахунковий параметр, який визначається як інтервал часу між розрахунковим початком імпульсу струму O₁ і моментом часу, в якому струм блискавки зменшився до половини свого пікового значення на спаді імпульсу (див. рис. А.1).

Длительность полуспада импульса тока (T₂) – Расчетный параметр, определяемый как интервал времени между расчетным началом импульса тока O₁ и моментом времени, в котором ток молнии уменьшился до половины своего пикового значения на спаде импульса (см. рис. А.1).

15) IEC 62305-1:2010, 3.15

Flash duration (T) – Time for which the lightning current flows at the point of strike.

Тривалість спалаху (T) – Час, протягом якого струм блискавки протікає в точці удару.

Длительность вспышки (T) – Время, на протяжении которого ток молнии протекает в точке удара.

16) IEC 62305-1:2010, 3.16

Duration of long stroke current (T_{LONG}) – Time duration during which the current in a long stroke is between 10 % of the peak value during the increase of the continuing current and 10 % of the peak value during the decrease of the continuing current (see Fig. A.2).

Тривалість струму тривалого удару (T_{LONG}) – Час, протягом якого струм тривалого удару знаходиться між 10 % свого пікового значення при збільшенні струму та 10 % пікового значення при зменшенні струму (див. рис. А.2).

Длительность тока долгого удара (T_{LONG}) – Время, в течение которого ток долгого удара находится между 10 % своего пикового значения при увеличении тока и 10 % своего пикового значения при уменьшении тока (см. рис. А.2).

17) IEC 62305-1:2010, 3.17

Flash charge (Q_{FLASH}) – Value resulting from the time integral of the lightning current for the entire lightning flash duration.

Заряд спалаху (Q_{FLASH}) – Значення, отримане інтегруванням струму блискавки за тривалістю розряду блискавки.

Заряд вспышки (Q_{FLASH}) – Значение, полученное интегрированием тока молнии по длительности разряда молнии.

18) IEC 62305-1:2010, 3.18

Impulse charge (Q_{SHORT}) – Value resulting from the time integral of the lightning current in an impulse.

Заряд імпульсу (Q_{SHORT}) – Значення, отримане інтегруванням струму блискавки за часом імпульсу.

Заряд импульса (Q_{SHORT}) – Значение, полученное интегрированием тока молнии по времени импульса.

19) IEC 62305-1:2010, 3.19

Long stroke charge (Q_{LONG}) – Value resulting from the time integral of the lightning current in a long stroke (see Fig. A.2).

Заряд тривалого удару (Q_{LONG}) – Значення, отримане інтегруванням струму блискавки за часом тривалого удару (див. рис. А.2).

Заряд долгого удара (Q_{LONG}) – Значение, полученное интегрированием тока молнии по времени долгого удара (см. рис. А.2).

20) IEC 62305-1:2010, 3.20

Specific energy (W/R) – Value resulting from the time integral of the square of the lightning current for the entire flash duration.

NOTE – It represents the energy dissipated by the lightning current in a unit resistance.

Питома енергія (W/R) – Значення, отримане інтегруванням квадрату струму блискавки за тривалістю спалаху блискавки.

ПРИМІТКА – Питома енергія – це енергія, яку виділяє струм блискавки на одиничному опорі.

Удельная энергия (W/R) – Значение, полученное интегрированием квадрата тока молнии по длительности вспышки молнии.

ПРИМЕЧАНИЕ – Удельная энергия – это энергия, выделяемая током молнии на единичном сопротивлении.

21) IEC 62305-1:2010, 3.21

Specific energy of impulse current – Value resulting from the time integral of the square of the lightning current for the duration of the impulse.

NOTE – The specific energy in a long stroke current is negligible.

Питома енергія імпульсу струму – Значення, отримане інтегруванням квадрату струму блискавки за часом імпульсу.

ПРИМІТКА – Питома енергія струму тривалого удару є незначною.

Удельная энергия импульса тока – Значение, полученное интегрированием квадрата тока молнии по времени импульса.

ПРИМЕЧАНИЕ – Удельная энергия тока долгого удара незначительна.

22) IEC 62305-1:2010, 3.34

IEC 62305-2:2010, 3.1.23

IEC 62305-4:2010, 3.6

Lightning electromagnetic impulse (LEMP) – All electromagnetic effects of lightning current via resistive, inductive and capacitive coupling that create surges and radiated electromagnetic fields.

Lightning electromagnetic impulse (LEMP) – All electromagnetic effects of lightning current via resistive, inductive and capacitive coupling, which create surges and electromagnetic fields.

Lightning electromagnetic impulse (LEMP) – All electromagnetic effects of lightning current via resistive, inductive and capacitive coupling which create surges and electromagnetic fields.

Електромагнітний імпульс блискавки (ЕМІБ) – Усі електромагнітні ефекти струму блискавки, які завдяки провідному, індуктивному та ємнісному зв'язкам створюють сплески та випромінені електромагнітні поля.

Электромагнитный импульс молнии (ЭМИМ) – Все электромагнитные эффекты тока молнии, которые посредством проводной, индуктивной и емкостной связей создают всплески и излучаемые электромагнитные поля.

23) IEC 62305-1:2010, 3.35

IEC 62305-2:2010, 3.1.24

IEC 62305-4:2010, 3.7

Surge – Transient created by LEMP that appears as an overvoltage and or an overcurrent.

Surge – Transient created by LEMP that appears as an overvoltage and/or overcurrent.

Surge – Transient created by LEMP that appears as an overvoltage and/or overcurrent.

Сплеск – Перехідний процес, створений ЕМІБ, який з'являється у вигляді перенапруги або надструму.

Всплеск – Переходный процесс, вызванный ЭМИМ, который появляется в виде перенапряжения или сверхтока.

24) IEC 62305-1:2010, 3.22

IEC 62305-2:2010, 3.1.1

Structure to be protected – Structure for which protection is required against the effects of lightning in accordance with this standard.

NOTE – A structure to be protected may be part of a larger structure.

Об'єкт, що захищається – Об'єкт, для якого потрібний захист від впливів блискавки відповідно до цього стандарту.

ПРИМІТКА – Об'єкт, що захищається, може бути частиною більшого об'єкту.

Защищаемый объект – Объект, для которого необходима защита от воздействия молнии в соответствии с настоящим стандартом.

ПРИМЕЧАНИЕ – Защищаемый объект может быть частью большего объекта.

25) IEC 62305-1:2010, 3.23

IEC 62305-2:2010, 3.1.11

Line – Power line or telecommunication line connected to the structure to be protected.

Лінія – Силова лінія або телекомунікаційна лінія, поєднана з об'єктом, що захищається.

Линия – Силовая линия или телекоммуникационная линия, соединенная с защищаемым объектом.

26) IEC 62305-1:2010, 3.24

IEC 62305-2:2010, 3.1.12

Telecommunication lines – Lines intended for communication between equipment that may be located in separate structures, such as a phone line and a data line.

Telecommunication lines – Lines intended for communication between equipment that may be located in separate structures, such as phone lines and data lines.

Телекомунікаційні лінії – Лінії, які призначені для зв'язку між пристроями, які можуть знаходитися в різних об'єктах, наприклад, телефонні лінії та лінії передачі даних.

Телекоммуникационные линии – Линии, предназначенные для связи между устройствами, которые могут быть расположены в различных объектах, например, телефонные линии и линии передачи данных.

27) IEC 62305-1:2010, 3.25

IEC 62305-2:2010, 3.1.13

Power lines – Distribution lines feeding electrical energy into a structure to power electrical and electronic equipment located there, such as low voltage (LV) or high voltage (HV) electric mains.

Силові лінії – Розподільні лінії, по яких електрична енергія подається в об'єкт для живлення розташованого там електричного та електронного устаткування, наприклад, лінії електричних мереж низької (НН) або високої напруги (ВН).

Силовые линии – Распределительные линии, подводящие электрическую энергию в объект для питания расположенного там электрического и электронного оборудования, например, линии электрических сетей низкого (НН) или высокого напряжения (ВН).

28) IEC 62305-2:2010, 3.1.28

Node – Point on a line from which onward surge propagation can be assumed to be neglected.

NOTE – Examples of nodes are a point on a power line branch distribution at an HV/LV transformer or on a power substation, a telecommunication exchange or an equipment (e.g. multiplexer or xDSL equipment) on a telecommunication line.

Вузл – Точка на лінії, далі від якої розповсюдженням сплесків можна знехтувати.

ПРИМІТКА – Прикладами вузлів є: точка приєднання силової лінії до ВН/НН трансформаторної або розподільчої підстанції; обладнання зв'язку (наприклад, мультиплексор або DSL обладнання) на телекомунікаційній лінії.

Узел – Точка на линии, далее от которой распространением всплесков можно пренебречь.

ПРИМЕЧАНИЕ – Примерами узлов являются: точка присоединения силового линии к ВН/НН трансформаторной или распределительной подстанции; оборудование связи (например, мультиплексор или DSL оборудование) на телекоммуникационной линии.

29) IEC 62305-1:2010, 3.28

IEC 62305-2:2010, 3.1.8

IEC 62305-3:2010, 3.20

IEC 62305-4:2010, 3.1

Electrical system – System incorporating low voltage power supply components.

Електрична система – Система, яка об'єднує низьковольтні компоненти електропостачання.

Электрическая система – Система, объединяющая низковольтные компоненты электроснабжения.

30) IEC 62305-1:2010, 3.29

IEC 62305-2:2010, 3.1.9

IEC 62305-3:2010, 3.21

IEC 62305-4:2010, 3.2

Electronic system – System incorporating sensitive electronic components such as telecommunication equipment, computer, control and instrumentation systems, radio systems, power electronic installations.

Електронна система – Система, яка об'єднує чутливі електронні компоненти, такі як телекомунікаційні пристрої, комп'ютери, системи керування й виміру, радіосистеми, силові електронні установки.

Электронная система – Система, объединяющая чувствительные электронные компоненты, такие как телекоммуникационные устройства, компьютеры, системы управления, измерительные системы, радиосистемы, силовые электронные установки.

31) IEC 62305-1:2010, 3.30

IEC 62305-2:2010, 3.1.10

IEC 62305-3:2010, 3.22

IEC 62305-4:2010, 3.3

Internal systems – Electrical and electronic systems within a structure.

Внутрішні системи – Електричні та електронні системи розташовані всередині об'єкту.

Внутренние системы – Электрические и электронные системы, расположенные внутри объекта.

32) IEC 62305-2:2010, 3.1.14

Dangerous event – Lightning flash to or near the structure to be protected, or to or near a line connected to the structure to be protected that may cause damage.

Небезпечна подія – Розряд блискавки поблизу чи в об'єкт, що захищається, або поблизу чи в лінію, яка входить до об'єкту, що захищається.

Опасное событие – Разряд молнии вблизи или в защищаемый объект, или вблизи или в линию, входящую в защищаемый объект.

33) IEC 62305-1:2010, 3.26

IEC 62305-2:2010, 3.1.15

Lightning flash to a structure – Lightning flash striking a structure to be protected (source of damage S_1).

Спалах блискавки в об'єкт – Спалах блискавки, який б'є в об'єкт, що захищається (джерело ушкодження S_1).

Вспышка молнии в объект – Вспышка молнии, бьющая в защищаемый объект (источник повреждения S_1).

34) IEC 62305-1:2010, 3.2.7

IEC 62305-2:2010, 3.1.16

Lightning flash near an object – Lightning flash striking close enough to a structure to be protected that it may cause dangerous overvoltages (source of damage S_2).

Lightning flash near a structure – Lightning flash striking close enough to a structure to be protected that it may cause dangerous overvoltages (source of damage S_2).

Спалах блискавки поблизу об'єкту – Спалах блискавки, який б'є досить близько до об'єкту, що захищається, що може викликати небезпечні перенапруги (джерело ушкодження S_2).

Вспышка молнии вблизи объекта – Вспышка молнии, бьющая достаточно близко к защищаемому объекту, что может вызвать опасные перенапряжения (источник повреждения S_2).

35) IEC 62305-2:2010, 3.1.17

Lightning flash to a line – Lightning flash striking a line connected to the structure to be protected (source of damage S_3).

Спалах блискавки в лінію – Спалах блискавки, який б'є в лінію, яка входить до об'єкту, що захищається (джерело ушкодження S_3).

Вспышка молнии в линию – Вспышка молнии, бьющая в линию, входящую в защищаемый объект (источник повреждения S_3).

36) IEC 62305-2:2010, 3.1.18

Lightning flash near a line – Lightning flash striking close enough to a line connected to the structure to be protected that it may cause dangerous overvoltages (source of damage S_4).

Спалах блискавки поблизу лінії – Спалах блискавки, який б'є досить близько до лінії, яка входить до об'єкту, що захищається, що може викликати небезпечні перенапруги (джерело ушкодження S_4).

Вспышка молнии вблизи линии – Вспышка молнии, бьющая достаточно близко к линии, входящей в защищаемый объект, что может вызвать опасные перенапряжения (источник повреждения S_4).

37) IEC 62305-2:2010, 3.1.19

Number of dangerous events due to flashes to a structure (N_D) – Expected average annual number of dangerous events due to lightning flashes to a structure.

Кількість небезпечних подій від спалахів в об'єкт (N_D) – Очікувана середньорічна кількість небезпечних подій, обумовлених спалахами блискавки в об'єкт.

Количество опасных событий от вспышек в объект (N_D) – Ожидаемое среднегодовое количество опасных событий, обусловленных вспышками молнии в объект.

38) IEC 62305-2:2010, 3.1.20

Number of dangerous events due to flashes to a

line (N_L) – Expected average annual number of dangerous events due to lightning flashes to a line.

Кількість небезпечних подій від спалахів в лінію (N_L) – Очікувана середньорічна кількість небезпечних подій, обумовлених спалахами блискавки в лінію.

Количество опасных событий от вспышек в линию (N_L) – Ожидаемое среднегодовое количество опасных событий, обусловленных вспышками молнии в линию.

39) IEC 62305-2:2010, 3.1.21

Number of dangerous events due to flashes near a structure (N_M) – Expected average annual number of dangerous events due to lightning flashes near a structure.

Кількість небезпечних подій від спалахів поблизу об'єкту (N_M) – Очікувана середньорічна кількість небезпечних подій, обумовлених спалахами блискавки поблизу об'єкту.

Количество опасных событий от вспышек вблизи объекта (N_M) – Ожидаемое среднегодовое количество опасных событий, обусловленных вспышками молнии вблизи объекта.

40) IEC 62305-2:2010, 3.1.22

Number of dangerous events due to flashes near a line (N_I) – Expected average annual number of dangerous events due to lightning flashes near a line.

Кількість небезпечних подій від спалахів поблизу лінії (N_I) – Очікувана середньорічна кількість небезпечних подій, обумовлених спалахами блискавки поблизу лінії.

Количество опасных событий от вспышек вблизи линии (N_I) – Ожидаемое среднегодовое количество опасных событий, обусловленных вспышками молнии вблизи линии.

41) IEC 62305-2:2010, 3.1.29

Probability of damage (P_X) – Probability that a dangerous event will cause damage to or in the structure to be protected.

Імовірність ушкодження (P_X) – Імовірність того, що небезпечна подія заподіє зовнішнє або внутрішнє ушкодження об'єкту, що захищається.

Вероятность повреждения (P_X) – Вероятность того, что опасное событие причинит внешнее или внутреннее повреждение защищаемому объекту.

42) IEC 62305-2:2010, 3.1.30

Loss (L_X) – Mean amount of loss (humans and goods) consequent on a specified type of damage due to a dangerous event, relative to the value (humans and goods) of the structure to be protected.

Збитки (L_X) – Відношення середньої кількості втрат (людей та товарів) внаслідок встановленого типу ушкодження, обумовленого небезпечною подією, до загальної кількості (людей та товарів) в об'єкті, що захищається.

Убытки (L_X) – Отношение среднего количества потерь (людей и товаров) вследствие установленного типа повреждения, обусловленного опасным событием, к общему количеству (людей и товаров) в защищаемом объекте.

43) IEC 62305-1:2010, 3.3.7

IEC 62305-2:2010, 3.1.31

Risk (R) – Value of probable average annual loss (humans or goods) due to lightning, relative to the total value (humans or goods) of the structure to be protected.

Risk (R) – Value of probable average annual loss (humans and goods) due to lightning, relative to the total value (humans and goods) of the structure to be protected.

Ризик (R) – Відношення імовірного середньорічного збитку (людей та товарів), заподіяваного блискавкою, до загальної кількості (людей та товарів) в об'єкті, що захищається.

Риск (R) – Отношение вероятного среднегодового убытка (людей и товаров), причиненного молнией, к общему количеству (людей и товаров) в защищаемом объекте.

44) IEC 62305-2:2010, 3.1.32

Risk component (R_x) – Partial risk depending on the source and the type of damage.

Компонент ризику (R_x) – Складова ризику, яка залежить від джерела та типу пошкодження.

Компонент риска (R_x) – Составляющая риска, зависящая от источника и типа повреждений.

45) IEC 62305-1:2010, 3.38

IEC 62305-2:2010, 3.1.33

Tolerable risk (R_T) – Maximum value of the risk which can be tolerated for the structure to be protected.

Припустимий ризик (R_T) – Максимальне значення ризику, яке є припустимим для об'єкту, що захищається.

Допустимый риск (R_T) – Максимальное значение риска, допустимое для защищаемого объекта.

46) IEC 62305-2:2010, 3.1.34

Zone of a structure (Z_S) – Part of a structure with homogeneous characteristics where only one set of parameters is involved in assessment of a risk component.

Зона об'єкту (Z_S) – Частина об'єкту з однорідними характеристиками, для якої під час оцінки компоненту ризику використовується єдиний набір параметрів.

Зона об'єкта (Z_S) – Часть объекта с однородными характеристиками, для которой при оценке компонента риска используют единый набор параметров.

47) IEC 62305-2:2010, 3.1.35

Section of a line (S_L) – Part of a line with homogeneous characteristics where only one set of parameters is involved in the assessment of a risk component.

Ділянка лінії (S_L) – Частина лінії з однорідними характеристиками, для якої під час оцінки компоненту ризику використовується єдиний набір параметрів.

Участок линии (S_L) – Часть линии с однородными характеристиками, для которой при оценке компонента риска используют единый набор параметров.

48) IEC 62305-1:2010, 3.31

IEC 62305-2:2010, 3.1.26

Physical damage – Damage to a structure (or to its contents) due to mechanical, thermal, chemical and explosive effects of lightning (type of damage D_2).

Physical damage – Damage to a structure (or to its contents) due to mechanical, thermal, chemical or explosive effects of lightning (type of damage D_2).

Фізичне ушкодження – Ушкодження об'єкту (або його умісту), спричинене механічними, теплови-

ми, хімічними та вибуховими діями блискавки (тип ушкодження D_2).

Физическое повреждение – Повреждение объекта (или его содержимого), причиненное механическими, тепловыми, химическими и взрывными воздействиями молнии (тип повреждения D_2).

49) IEC 62305-1:2010, 3.32

IEC 62305-2:2010, 3.1.27

Injury of living beings – Permanent injuries, including loss of life, to people or to animals by electric shock due to touch and step voltages caused by lightning.

NOTE – Although living beings may be injured in other ways, in this standard the term 'injury to living beings' is limited to the threat due to electrical shock (type of damage D_1).

Injury of living beings – Permanent injuries, including loss of life, to people or to animals by electric shock due to touch and step voltages caused by lightning.

NOTE – Although living beings may be injured in other ways, in this part of IEC 62305 the term 'injury to living beings' is limited to the threat due to electrical shock (type of damage D_1).

Каліцтво живих істот – Непоправна шкода людям або тваринам, у тому числі втрата життя, спричинена ураженням електричним струмом від напруги кроку або дотику, які викликані блискавкою.

ПРИМІТКА – Не дивлячись на те, що непоправна шкода живим істотам може бути заподіяна в різні способи, в цій частині IEC 62305 термін «каліцтво живих істот» обмежений ураженням електричним струмом (тип ушкодження D_1).

Увече живих суцеств – Невосполнимый вред людям или животным, включая утрату жизни, причиненный поражением электрическим током от шагового напряжения или напряжения прикосновения, вызванных молнией.

ПРИМЕЧАНИЕ – Несмотря на то, что невозполнимый вред живым существам может быть причинен различными способами, в этой части IEC 62305 термин «увече живых существ» ограничен поражением электрическим током (тип повреждения D_1).

50) IEC 62305-1:2010, 3.33

IEC 62305-2:2010, 3.1.28

Failure of electrical and electronic systems – Permanent damage of electrical and electronic systems due to LEMP (type of damage D_3).

Ушкодження електричних та електронних систем – Ушкодження електричних та електронних систем, що не усувається, спричинене електромагнітним імпульсом блискавки (тип ушкодження D_3).

Повреждение электрических и электронных систем – Не устранимое повреждение электрических и электронных систем, причиненное электромагнитным импульсом молнии (тип повреждения D_3).

51) IEC 62305-1:2010, 3.40

IEC 62305-2:2010, 3.1.38

Protection measures – Measures to be adopted for the structure to be protected in order to reduce the risk.

Protection measures – Measures to be adopted in the structure to be protected in order to reduce the risk.

Заходи захисту – Заходи, які вживаються до

об'єкту, що захищається, для зниження ризику.

Мери защиты – Меры, применяемые к защищаемому объекту для снижения риска.

52) IEC 62305-1:2010, 3.41

IEC 62305-2:2010, 3.1.39

IEC 62305-4:2010, 3.4

Lightning protection (LP) – Complete system for protection of structures against lightning, including their internal systems and contents, as well as persons. In general consisting of an LPS and SPM.

Lightning protection – Complete system for protection of structures against lightning, including their internal systems and contents, as well as persons, in general consisting of an LPS and SPM.

Lightning protection (LP) – Complete system for the protection of structures and/or electrical and electronic systems in those structures from the effects of lightning, consisting of an LPS and SPM.

Блисканкозахист (БЗ) – Повна система захисту об'єктів від блискавки, включно їхні внутрішні системи, уміст та людей. В загальному випадку включає у себе систему блисканкозахисту (СБЗ) та систему захисту від електромагнітного імпульсу блискавки (СЗЕМІБ).

Молниезащита (МЗ) – Полная система защиты объектов от молнии, включая их внутренние системы, содержимое и людей. В общем случае включает в себя систему молниезащиты (СМЗ) и систему защиты от электромагнитного импульса молнии (СЗЭМИМ).

53) IEC 62305-1:2010, 3.39

IEC 62305-2:2010, 3.1.37

IEC 62305-4:2010, 3.9

Lightning protection level (LPL) – Number related to a set of lightning current parameters values relevant to the probability that the associated maximum and minimum design values will not be exceeded in naturally occurring lightning.

NOTE – Lightning protection level is used to design protection measures according to the relevant set of lightning current parameters.

Lightning protection level (LPL) – Number related to a set of lightning current parameters values relevant to the probability that the associated maximum and minimum design values will not be exceeded in naturally occurring lightning.

NOTE – Lightning protection level is used to design protection measures according to the relevant set of lightning current parameters.

Lightning protection level (LPL) – Number related to a set of lightning current parameters relevant to the probability that the associated maximum and minimum design values will not be exceeded in naturally occurring lightning.

NOTE – Lightning protection level is used to design protection measures according to the relevant set of lightning current parameters.

Рівень блисканкозахисту (РБЗ) – Номер, присвоєний набору значень параметрів струму блискавки, який характеризує імовірність того, що значення параметрів природної блискавки не перевищать максимальні та мінімальні розрахункові значення, прийняті

в цьому наборі.

ПРИМІТКА – Рівень блисканкозахисту використовується при розробці заходів захисту, які відповідають визначеному набору параметрів струму блискавки.

Уровень молниезащиты (УМЗ) – Номер, присвоенный набору значений параметров тока молнии, характеризующий вероятность того, что значения параметров естественной молнии не превысят максимальных и минимальных расчетных значений, принятых в указанном наборе.

ПРИМЕЧАНИЕ – Уровень молниезащиты используется при разработке мер защиты, соответствующих определенному набору параметров тока молнии.

54) IEC 62305-1:2010, 3.42

IEC 62305-2:2010, 3.1.40

IEC 62305-3:2010, 3.1

IEC 62305-4:2010, 3.5

Lightning protection system (LPS) – Complete system used to reduce physical damage due to lightning flashes to a structure.

NOTE – It consists of both external and internal lightning protection systems.

Система блисканкозахисту (СБЗ) – Повна система, призначена для зменшення фізичних ушкоджень при спалаху блискавки в об'єкт.

ПРИМІТКА – СБЗ складається з зовнішньої та внутрішньої систем блисканкозахисту.

Система молниезащиты (СМЗ) – Полная система, предназначенная для уменьшения физических повреждений при вспышке молнии в объект.

ПРИМЕЧАНИЕ – СМЗ состоит из внешней и внутренней систем молниезащиты.

55) IEC 62305-3:2010, 3.32

Lightning protection designer – Specialist competent and skilled in the design of the LPS.

Проектувальник блисканкозахисту – Особа, яка має кваліфікацію та досвід у проектуванні СБЗ.

Проектировщик молниезащиты – Лицо, имеющее кваліфікацию и опыт проектирования СМЗ.

56) IEC 62305-3:2010, 3.33

Lightning protection installer – Person competent and skilled in the installation of the LPS.

Установник блисканкозахисту – Особа, яка має кваліфікацію та досвід у встановленні СБЗ.

Установщик молниезащиты – Лицо, имеющее кваліфікацию и опыт установки СМЗ.

57) IEC 62305-3:2010, 3.31

Class of LPS – Number denoting the classification of an LPS according to the lightning protection level for which it is designed.

Клас СБЗ – Номер, що класифікує систему блисканкозахисту відповідно до рівня блисканкозахисту, для якого ця система проектується.

Класс СМЗ – Номер, классифицирующий систему молниезащиты в соответствии с уровнем молниезащиты, для которого эта система проектируется.

58) IEC 62305-1:2010, 3.36

IEC 62305-2:2010, 3.1.36

IEC 62305-4:2010, 3.10

Lightning protection zone (LPZ) – Zone where the lightning electromagnetic environment is defined.

NOTE – The zone boundaries of an LPZ are not necessarily physical boundaries (e.g. walls, floor and ceiling).

Зона блискавкозахисту (ЗБЗ) – Зона, де визначається електромагнітна обстановка блискавки.

ПРИМІТКА – Межі ЗБЗ не обов'язково є фізичними межами (наприклад, стіни, підлога та перекриття).

Зона молниезащити (ЗМЗ) – Зона, где определяется электромагнитная обстановка молнии.

ПРИМЕЧАНИЕ – Границы ЗМЗ не обязательно являются физическими границами (например, стены, пол и перекрытия).

59) IEC 62305-2:2010, 3.1.2

IEC 62305-3:2010, 3.34

Structures with risk of explosion – Structures containing solid explosives materials or hazardous zones as determined in accordance with IEC 60079-10-1 [2] and IEC 60079-10-2 [3].

Вибухонебезпечний об'єкт – Об'єкт, який містить тверді вибухові матеріали або небезпечні зони, визначені згідно з IEC 60079-10-1 [2] та IEC 60079-10-2 [3].

Взрывоопасный объект – Объект, содержащий твердые взрывчатые вещества или опасные зоны, определенные в соответствии с IEC 60079-10-1 [2] и IEC 60079-10-2 [3].

60) IEC 62305-2:2010, 3.1.3

Structures dangerous to the environment – Structures which may cause biological, chemical or radioactive emission as a consequence of lightning (such as chemical, petrochemical, nuclear plants, etc.).

Екологічно небезпечні об'єкти – Об'єкти, які можуть викликати біологічне, хімічне або радіоактивне забруднення внаслідок впливу блискавки (хімічні та нафтопереробні підприємства, атомні електростанції тощо).

Экологически опасные объекты – Объекты, которые могут вызвать биологическое, химическое или радиоактивное загрязнение вследствие воздействия молнии (химические и нефтеперерабатывающие предприятия, атомные электростанции и т.д.).

61) IEC 62305-2:2010, 3.1.4

Urban environment – Area with a high density of buildings or densely populated communities with tall buildings.

NOTE – 'Town centre' is an example of an urban environment.

Міське середовище – Простір з високою щільністю забудови або щільно заселеними житловими мікрорайонами з висотними будинками.

ПРИМІТКА – Прикладом міського середовища є центр міста.

Городская среда – Пространство с высокой плотностью застройки или плотно заселенными жилыми микрорайонами с высотными зданиями.

ПРИМЕЧАНИЕ – Примером городской среды является центральная часть города.

62) IEC 62305-2:2010, 3.1.5

Suburban environment – Area with a medium den-

sity of buildings.

NOTE – 'Town outskirts' is an example of a suburban environment.

Приміське середовище – Простір з середньою щільністю забудови.

ПРИМІТКА – Прикладом приміської зони є приміські райони.

Пригородная среда – Пространство со средней плотностью застройки.

ПРИМЕЧАНИЕ – Примером пригородной среды являются пригородные районы.

63) IEC 62305-2:2010, 3.1.6

Rural environment – Area with a low density of buildings.

NOTE – 'Countryside' is an example of a rural environment.

Сільське середовище – Простір з низькою щільністю забудови.

ПРИМІТКА – Прикладом сільського середовища є селище.

Сельская среда – Пространство с низкой плотностью застройки.

ПРИМЕЧАНИЕ – Примером сельской среды является село, поселок.

64) IEC 62305-2:2010, 3.1.43

Lightning protective cable – Special cable with increased dielectric strength and whose metallic sheath is in continuous contact with the soil either directly or by use of conducting plastic covering.

Блискавкозахисний кабель – Спеціальний кабель з підвищеною електричною міцністю, металева оболонка якого знаходиться у неперервному контакті з ґрунтом безпосередньо або через провідне пластикове покриття.

Молниезащитный кабель – Специальный кабель с повышенной электрической прочностью, металлическая оболочка которого находится в непрерывном контакте с грунтом непосредственно или через проводящее пластиковое покрытие.

65) IEC 62305-2:2010, 3.1.44

Lightning protective cable duct – Cable duct of low resistivity in contact with the soil.

EXAMPLE – Concrete with interconnected structural steel reinforcements or metallic duct.

Блискавкозахисний кабельний канал – Кабельний канал, який має низький питомий опір при контакті з ґрунтом.

ПРИКЛАД – Залізобетонний канал з взаємопов'язаною арматурою або металевий канал.

Молниезащитный кабельный канал – Кабельный канал, имеющий низкое удельное сопротивление при контакте с грунтом.

ПРИМЕР – Железобетонный канал с взаимосвязанной арматурой или металлический канал.

66) IEC 62305-2:2010, 3.1.49

Zone 0 – Place in which an explosive atmosphere consisting of a mixture of air and flammable substances in the form of gas, vapour or mist is present continuously or for long periods or frequently (IEC 60050-426:2008. 426-03-03, modified [5]).

Зона 0 – Простір, в якому вибухонебезпечно се-

редовище, що містить суміш повітря та легкозаймистих речовин у формі газу, пари або пилу, присутні постійно, або протягом тривалих періодів часу, або часто (IEC 60050-426:2008, 426-03-03, модифіковано [5]).

Зона 0 – Пространство, в котором взрывоопасная среда, содержащая смесь воздуха и легковоспламеняющихся веществ в форме газа, пара или пыли, присутствует постоянно, или на протяжении длительных периодов времени, или часто (IEC 60050-426:2008, 426-03-03, модифицировано [5]).

67) IEC 62305-2:2010, 3.1.50

Zone 1 – Place in which an explosive atmosphere consisting of a mixture of air and flammable substances in the form of gas, vapour or mist is likely to occur in normal operation occasionally (IEC 60050-426:2008, 426-03-04, modified [5]).

Зона 1 – Простір, в якому вибухонебезпечно середовище, що містить суміш повітря та легкозаймистих речовин у формі газу, пари або пилу, зазвичай виникає зрідка в нормальному режимі роботи (IEC 60050-426:2008, 426-03-04, модифіковано [5]).

Зона 1 – Пространство, в котором взрывоопасная среда, содержащая смесь воздуха и легковоспламеняющихся веществ в форме газа, пара или пыли, обычно возникает изредка в нормальном режиме работы (IEC 60050-426:2008, 426-03-04, модифицировано [5]).

68) IEC 62305-2:2010, 3.1.51

Zone 2 – Place in which an explosive atmosphere consisting of a mixture of air and flammable substances in the form of gas, vapour or mist is not likely to occur in normal operation but, if it does occur, will persist for a short period only.

NOTE 1 – In this definition, the word 'persist' means the total time for which the flammable atmosphere will exist. This will normally comprise the total of the duration of the release, plus the time taken for the flammable atmosphere to disperse after the release has stopped.

NOTE 2 – Indications of the frequency of the occurrence and duration may be taken from codes relating to specific industries or applications.

(IEC 60050-426:2008, 426-03-05, modified [5]).

Зона 2 – Простір, в якому вибухонебезпечно середовище, що містить суміш повітря та легкозаймистих речовин у формі газу, пари або пилу, зазвичай не виникає в нормальному режимі роботи, а якщо і виникає, то зберігається тільки короткий період часу.

ПРИМІТКА 1 – В цьому визначенні слово «зберігається» означає повний час, протягом якого вибухонебезпечно середовище існуватиме. Цей час зазвичай міститиме загальну тривалість вивільнення легкозаймистих речовин, а також час, необхідний для їх розсіювання після закінчення вивільнення.

ПРИМІТКА 2 – Показники частоти виникнення та тривалості можуть бути отримані в промислових та галузевих стандартах та нормах.

(IEC 60050-426:2008, 426-03-05, модифіковано [5]).

Зона 2 – Пространство, в котором взрывоопасная среда, содержащая смесь воздуха и легко-

воспламеняющихся веществ в форме газа, пара или пыли, обычно не возникает в нормальном режиме работы, а если и возникает, то сохраняется только короткий период времени.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 – В данном определении слово «сохраняется» означает полное время, в течение которого взрывоопасная среда будет существовать. Это время будет обычно содержать общую длительность высвобождения легковоспламеняющихся веществ, а также время, необходимое для их рассеяния после окончания высвобождения.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 – Показатели частоты возникновения и продолжительности могут быть получены из промышленных и отраслевых стандартов и норм.

(IEC 60050-426:2008, 426-03-05, модифицировано [5]).

69) IEC 62305-2:2010, 3.1.52

Zone 20 – Place in which an explosive atmosphere, in the form of a cloud of combustible dust in air, is present continuously, or for long periods, or frequently (IEC 60079-10-2:2009, 6.2, modified [3]).

Зона 20 – Простір, в якому вибухонебезпечно середовище у формі хмари горючого пилу у повітрі присутні постійно, або протягом тривалих періодів часу, або часто (IEC 60079-10-2:2009, 6.2, модифіковано [3]).

Зона 20 – Пространство, в котором взрывоопасная среда в форме облака горючей пыли в воздухе присутствует постоянно, или на протяжении длительных периодов времени, или часто (IEC 60079-10-2:2009, 6.2, модифицировано [3]).

70) IEC 62305-2:2010, 3.1.53

Zone 21 – Place in which an explosive atmosphere, in the form of a cloud of combustible dust in air, is likely to occur in normal operation occasionally (IEC 80079-10-2:2009, 6.2, modified [3]).

Зона 21 – Простір, в якому вибухонебезпечно середовище у формі хмари горючого пилу у повітрі зазвичай виникає зрідка в нормальному режимі роботи (IEC 60079-10-2:2009, 6.2, модифіковано [3]).

Зона 21 – Пространство, в котором взрывоопасная среда в форме облака горючей пыли в воздухе обычно возникает изредка в нормальном режиме работы (IEC 60079-10-2:2009, 6.2, модифицировано [3]).

71) IEC 62305-2:2010, 3.1.54

Zone 22 – Place in which an explosive atmosphere, in the form of a cloud of combustible dust in air, is not likely to occur in normal operation but, if it does occur, will persist for a short period only (IEC 80079-10-2:2009, 6.2, modified [3]).

Зона 22 – Простір, в якому вибухонебезпечно середовище у формі хмари горючого пилу у повітрі зазвичай не виникає в нормальному режимі роботи, а якщо і виникає, то зберігається тільки короткий період часу (IEC 60079-10-2:2009, 6.2, модифіковано [3]).

Зона 22 – Пространство, в котором взрывоопасная среда в форме облака горючей пыли в воздухе обычно не возникает в нормальном режиме работы, а если и возникает, то сохраняется только короткий период времени (IEC 60079-10-2:2009, 6.2, модифицировано [3]).

72) IEC 62305-1:2010, 3.43**IEC 62305-3:2010, 3.2**

External lightning protection system – Part of the LPS consisting of an air-termination system, a down-conductor system and an earth-termination system.

Зовнішня система блискавкозахисту – Частина СБЗ, до складу якої входять система блискавкоприймачів, система струмовідводів та система заземлювачів.

Внешняя система молниезащиты – Часть СМЗ, включающая в себя систему молниеприемников, систему токоотводов и систему заземлителей.

73) IEC 62305-3:2010, 3.3

External LPS isolated from the structure to be protected – LPS with an air-termination system and down-conductor system positioned in such a way that the path of the lightning current has no contact with the structure to be protected.

NOTE – In an isolated LPS, dangerous sparks between the LPS and the structure are avoided.

Зовнішня СБЗ, ізольована від об'єкту, що захищається – СБЗ, в якій системи блискавкоприймачів та струмовідводів розташовані таким чином, що шлях струму блискавки не має контактів з об'єктом, що захищається.

ПРИМІТКА – В ізольованій СБЗ виключене небезпечне іскріння між СБЗ та об'єктом.

Внешняя СМЗ, изолированная от защищаемого объекта – СМЗ, в которой системы молниеприемников и токоотводов расположены таким образом, что путь тока молнии не имеет контактов с защищаемым объектом.

ПРИМЕЧАНИЕ – В изолированной СМЗ исключено опасное искрение между СМЗ и объектом.

74) IEC 62305-3:2010, 3.4

External LPS not isolated from the structure to be protected – LPS with an air-termination system and down-conductor system positioned in such a way that the path of the lightning current can be in contact with the structure to be protected.

Зовнішня СБЗ, не ізольована від об'єкту, що захищається – СБЗ, в якій системи блискавкоприймачів та струмовідводів розташовані таким чином, що шлях струму блискавки може бути в контакті з об'єктом, що захищається.

Внешняя СМЗ, не изолированная от защищаемого объекта – СМЗ, в которой системы молниеприемников и токоотводов расположены таким образом, что путь тока молнии может быть в контакте с защищаемым объектом.

75) IEC 62305-1:2010, 3.45**IEC 62305-3:2010, 3.6**

Air-termination system – Part of an external LPS using metallic elements such as rods, mesh conductors or catenary wires intended to intercept lightning flashes.

Система блискавкоприймачів – Частина зовнішньої СБЗ, яка використовує стрижньові, сітчасті або тросові металеві елементи для перехоплення спалахів блискавки.

Система молниеприемников – Часть внешней СМЗ, использующая стержневые, сеточные или тро-

совые металлические элементы для перехвата вспышек молнии.

76) IEC 62305-1:2010, 3.46**IEC 62305-3:2010, 3.7**

Down-conductor system – Part of an external LPS intended to conduct lightning current from the air-termination system to the earth-termination system.

Down-conductor system – Part of an external LPS intended to conduct lightning current between the air-termination system and the earth-termination system.

Система струмовідводів – Частина зовнішньої СБЗ, призначена для відводу струму блискавки від системи блискавкоприймачів до системи заземлювачів.

Система токоотводов – Часть внешней СМЗ, предназначенная для отвода тока молнии от системы молниеприемников к системе заземлителей.

77) IEC 62305-3:2010, 3.8

Ring conductor – Conductor forming a loop around the structure and interconnecting the down-conductors for distribution of lightning current among them.

Кільцевий провідник – Провідник, що утворює петлю навколо об'єкту та поєднує струмовідводи для перерозподілу струму блискавки між ними.

Кольцевой проводник – Проводник, образующий петлю вокруг объекта и соединяющий токоотводы для распределения тока молнии между ними.

78) IEC 62305-1:2010, 3.47**IEC 62305-3:2010, 3.9****IEC 62305-4:2010, 3.13**

Earth-termination system – Part of an external LPS which is intended to conduct and disperse lightning current into the earth.

Система заземлювачів – Частина зовнішньої СБЗ, призначена проводити та розсіювати струм блискавки в землю.

Система заземлителей – Часть внешней СМЗ, предназначенная для отвода и рассеяния тока молнии в землю.

79) IEC 62305-3:2010, 3.10

Earth electrode – Part or a group of parts of the earth-termination system which provides direct electrical contact with the earth and disperses lightning current to the earth.

Заземлювач – Частина або група частин системи заземлювачів, що забезпечує безпосередній електричний контакт з ґрунтом та розсіює струм блискавки в землі.

Заземлитель – Часть или группа частей системы заземлителей, которая обеспечивает прямой электрический контакт с землей и рассеивает ток молнии в земле.

80) IEC 62305-3:2010, 3.11

Ring earth electrode – Earth electrode forming a closed loop around the structure below or on the surface of the earth.

Кільцевий заземлювач – Заземлювач, що утворює під землею або на її поверхні замкнену петлю навколо об'єкту.

Кольцевой заземлитель – Заземлитель, образующий под землей или на ее поверхности замкнутую

петлю вокруг объекта.

81) IEC 62305-3:2010, 3.12

Foundation earth electrode – Conductive part buried in the soil under a building foundation or, preferably, embedded in concrete of a building foundation, generally in form of a closed loop (IEC 60050-826:2004. 826-13-08 [3]).

Фундаментний заземлювач – Провідна частина, яка виконана зазвичай в формі замкненої петлі та встановлена в ґрунті під фундаментом будівлі або, що найкраще, розміщена в бетоні фундаменту будівлі (IEC 60050-826:2004. 826-13-08 [3]).

Фундаментный заземлитель – Проводящая часть, выполненная, как правило, в форме замкнутой петли и установленная в грунте под фундаментом здания или, что предпочтительнее, расположена в бетоне фундамента здания (IEC 60050-826:2004. 826-13-08 [3]).

82) IEC 62305-1:2010, 3.50

IEC 62305-3:2010, 3.13

Conventional earthing impedance – Ratio of the peak values of the earth-termination voltage and the earth-termination current which, in general, do not occur simultaneously.

Conventional earth impedance – Ratio of the peak values of the earth-termination voltage and the earth-termination current which, in general, do not occur simultaneously.

Умовний імпеданс заземлювача – Відношення пікового значення напруги на заземлювачі до пікового значення струму, що протікає по заземлювачу, які, у загальному випадку, виникають неодноразово.

Условный импеданс заземлителя – Отношение пикового значения напряжения на заземлителе к пиковому значению тока, протекающего по заземлителю, которые, в общем случае, не совпадают по времени.

83) IEC 62305-3:2010, 3.14

Earth-termination voltage – Potential difference between the earth-termination system and the remote earth.

Напруга на заземлювачі – Різниця потенціалів між системою заземлювачів та віддаленою землею.

Напряжение на заземлителе – Разность потенциалов между системой заземлителей и удаленной землей.

84) IEC 62305-3:2010, 3.15

Natural component of LPS – Conductive component installed not specifically for lightning protection which can be used in addition to the LPS or in some cases could provide the function of one or more parts of the LPS.

NOTE – Examples of the use of this term include:

- natural air-termination;
- natural down-conductor;
- natural earth electrode.

Природний компонент СБЗ – Провідний компонент, встановлений не спеціально для блискавкозахисту, який можна використовувати в доповнення до СБЗ або в деяких випадках може виконувати функції однієї чи кількох частин СБЗ.

ПРИМІТКА – Приклади використання даного терміну:

- природний блискавкоприймач;
- природний струмовідвід;
- природний заземлювач.

Естественный компонент СМЗ – Проводящий компонент, установленный не специально для молниезащиты, который может использоваться в дополнение к СМЗ или в некоторых случаях может выполнять функцию одной или нескольких частей СМЗ.

ПРИМЕЧАНИЕ – Примеры использования данного термина:

- естественный молниеприемник;
- естественный токоотвод;
- естественный заземлитель.

85) IEC 62305-3:2010, 3.18

Metal installations – Extended metal items in the structure to be protected which may form a path for lightning current, such as pipework, staircases, elevator guide rails, ventilation, heating and air-conditioning ducts, interconnected reinforcing steel, structural metal parts.

Металеві установки – Протяжні металеві елементи об'єкту, що захищається, які здатні утворити шлях для струму блискавки, наприклад, трубопроводи, сходові хідні, направляючі конструкції ліфту, короби систем вентиляції та кондиціонування повітря, системи опалення, а також сталеві арматури та металеві елементи конструкції.

Металлические установки – Протяженные металлические элементы защищаемого объекта, способные создавать путь для тока молнии, например, трубопроводы, лестничные марши, направляющие конструкции лифта, короба систем вентиляции и кондиционирования воздуха, отопительные системы, а также стальная арматура и металлические элементы конструкции.

86) IEC 62305-3:2010, 3.16

Connecting component – Part of an LPS which is used for the connection of conductor to each other or to metallic installations.

NOTE – This also includes bridging component and expansion piece.

З'єднувальний компонент – Частина СБЗ, яка використовується для приєднання провідників один до одного або до металевих установок.

ПРИМІТКА – Такими елементами також є шунтуючі компоненти та компенсатори.

Соединительный компонент – Часть СМЗ, которая используется для присоединения проводников друг к другу или к металлическим установкам.

ПРИМЕЧАНИЕ – К этим элементам также относятся шунтирующие компоненты и компенсаторы.

87) IEC 62305-3:2010, 3.17

Fixing component – Part of an LPS which is used to fix the elements of the LPS to the structure to be protected.

Компонент кріплення – Частина СБЗ, яка використовується для кріплення елементів СБЗ до об'єкту, що захищається.

Крепежный компонент – Часть СМЗ, которая используется для крепления элементов СМЗ к защи-

щасемому об'єкту.

88) IEC 62305-1:2010, 3.48

IEC 62305-3:2010, 3.19

External conductive parts – Extended metal items entering or leaving the structure to be protected such as pipe works, cable metallic elements, metal ducts, etc. which may carry a part of the lightning current.

External conductive parts – Extended metal items entering or leaving the structure to be protected such as pipework, metallic cable elements, metal ducts, etc. which may carry a part of the lightning current.

Зовнішні провідні частини – Протяжні металеві елементи, що входять або виходять із об'єкту, що захищається, такі як трубопроводи, металеві елементи кабелів, металеві короби і т.п., які здатні проводити частину струму блискавки.

Внешние проводящие части – Протяженные металлические элементы, входящие или выходящие из защищаемого объекта, такие как трубопроводы, металлические элементы кабелей, металлические короба и т. д., которые могут проводить часть тока молнии.

89) IEC 62305-3:2010, 3.30

Test joint – Joint designed to facilitate electrical testing and measurement of LPS components.

Вимірювальне з'єднання – З'єднання, що спроектоване для полегшення виконання електричних випробувань та виміру параметрів компонентів СБЗ.

Измерительная соединение – Соединение, спроектированное для упрощения выполнения электрических испытаний и измерения параметров компонентов СМЗ.

90) IEC 62305-1:2010, 3.44

IEC 62305-3:2010, 3.5

Internal lightning protection system – Part of the LPS consisting of lightning equipotential bonding and/or electrical insulation of external LPS.

Внутрішня система блискавкозахисту – Частина СБЗ, до складу якої входять еквіпотенційне з'єднання та/або електричне ізолювання зовнішньої СБЗ.

Внутренняя система молниезащиты – Часть СМЗ, включающая в себя эквипотенциальное соединение и/или электрическое изолирование внешней СМЗ.

91) IEC 62305-1:2010, 3.49

IEC 62305-2:2010, 3.1.48

IEC 62305-3:2010, 3.23

Lightning equipotential bonding (EB) – Bonding to LPS of separated metallic parts, by direct conductive connections or via surge protective devices, to reduce potential differences caused by lightning current.

Lightning equipotential bonding (EB) – Bonding to LPS of separated metallic parts, by direct conductive connections or via surge protective devices, to reduce potential differences caused by lightning current.

Lightning equipotential bonding (EB) – Bonding to the LPS of separated conductive parts, by direct connections or via surge protective devices, to reduce potential differences caused by lightning current.

Еквіпотенційне з'єднання (ЕЗ) (з'єднання зрівнювання потенціалів блискавки) – Приєднання до СБЗ окремих провідних частин або безпосередньо, або

через пристрій захисту від сплесків для зменшення різниць потенціалів, спричинених струмом блискавки.

Эквипотенциальное соединение (ЭС) (соединение уравнивания потенциалов молнии) – Присоединение к СМЗ отдельных проводящих частей либо непосредственно, либо через устройство защиты от всплесков для уменьшения разностей потенциалов, вызванных током молнии.

92) IEC 62305-3:2010, 3.24

Bonding bar – Metal bar on which metal installations, external conductive parts, electric power and telecommunication lines and other cables can be bonded to an LPS.

З'єднувальна шина – Металева планка, на якій можуть бути приєднані до СБЗ металеві установки, зовнішні провідні частини, силові та телекомунікаційні лінії та інші кабелі.

Соединительная шина – Металлическая планка, на которой могут быть присоединены к СМЗ металлические установки, внешние проводящие части, силовые и телекоммуникационные линии и другие кабели.

93) IEC 62305-3:2010, 3.25

Bonding conductor – Conductor connecting separated conductive parts to LPS.

З'єднувальний провідник – Провідник, що з'єднує окремі провідні частини з СБЗ.

Соединительный проводник – Проводник, соединяющий отдельные проводящие части с СМЗ.

94) IEC 62305-3:2010, 3.26

Interconnected reinforcing steel – Steelwork within a concrete structure which is considered electrically continuous.

Взаємопов'язана арматура – Металоконструкція всередині бетонного об'єкту, яка розглядається як електрично безперервна.

Взаимосвязанная арматура – Металлоконструкция внутри бетонного объекта, которая рассматривается как электрически непрерывная.

95) IEC 62305-3:2010, 3.27

Dangerous sparking – Electrical discharge due to lightning which causes physical damage in the structure to be protected.

Небезпечне іскріння – Електричний розряд, обумовлений блискавкою, який викликає фізичні uszkodження в об'єкті, що захищається.

Опасное искрение – Электрический разряд, обусловленный молнией, который вызывает физическое повреждение в защищаемом объекте.

96) IEC 62305-3:2010, 3.28

Separation distance – Distance between two conductive parts at which no dangerous sparking can occur.

Розділова відстань – Відстань між двома провідними частинами, на якій не може відбутися небезпечне іскріння.

Разделительное расстояние – Расстояние между двумя проводящими частями, на котором не возникает опасное искрение.

97) IEC 62305-3:2010, 3.35

Isolating spark gap (ISG) – Component with discharge distance for isolating electrically conductive installation sections.

NOTE – In the event of a lightning strike, the installation sections are temporarily connected conductively as the result of response to the discharge.

Ізолюючий іскровий розрядник (ІР) – Компонент з розрядним проміжком для ізолювання електрично провідних секцій установки.

ПРИМІТКА – Протягом розряду блискавки секції установки тимчасово з'єднуються кондуктивно в результаті відгуку на розряд.

Ізолюючий іскровий розрядник (ІІР) – Компонент з розрядним проміжком для ізолювання електрически провідних секцій установки.

ПРИМЕЧАНИЕ – В ходе разряда молнии секции установки временно соединяются кондуктивно в результате отклика на разряд.

98) IEC 62305-1:2010, 3.55

IEC 62305-2:2010, 3.1.7

IEC 62305-4:2010, 3.8

Rated impulse withstand voltage level (U_w) – Impulse withstand voltage assigned by the manufacturer to the equipment or to a part of it, characterizing the specified withstand capability of its insulation against overvoltages.

NOTE – For the purposes of this standard, only withstand voltage between live conductors and earth is considered. [IEC 60664-1:2007 definition 3.9.2].

Rated impulse withstand voltage level (U_w) – Impulse withstand voltage assigned by the manufacturer to the equipment or to a part of it, characterizing the specified withstand capability of its insulation against (transient) overvoltages.

[IEC 60664-1:2007 definition 3.9.2, modified][4].

NOTE – For the purposes of this part of IEC 62305, only the withstand voltage between live conductors and earth is considered.

Rated impulse withstand voltage level (U_w) – Impulse withstand voltage assigned by the manufacturer to the equipment or to a part of it, characterizing the specified withstand capability of its insulation against overvoltages.

NOTE – For the purposes of this part of IEC 62305, only withstand voltage between live conductors and earth is considered.

Номинальна імпульсна напруга, що витримується (U_w) – Імпульсна напруга, що витримується, яка встановлюється виробником для устаткування або його частини та характеризує здатність ізоляції витримувати перехідні перенапруги (IEC 60664-1:2007 визначення 3.9.2 [4]).

ПРИМІТКА – В цій частині стандарту IEC 62305 розглядається лише напруга, що витримується, між струмовідними провідниками та землею.

Номинальное выдерживаемое импульсное напряжение (U_w) – Выдерживаемое импульсное напряжение, установленное изготовителем для оборудования или его части, характеризующее способность изоляции выдерживать переходные перенапряжения (IEC 60664-1:2007 определение 3.9.2 [4]).

ПРИМЕЧАНИЕ – В данной части стандарта IEC 62305 рассматривается только выдерживаемое напряжение между токоведущими проводниками и

землей.

99) IEC 62305-1:2010, 3.51

IEC 62305-2:2010, 3.1.41

IEC 62305-4:2010, 3.11

LEMP protection measures (SPM) – Measures taken to protect internal systems against the effects of LEMP.

NOTE – This is part of overall lightning protection.

Система захисту від ЕМІБ (СЗЕМІБ) – Заходи, вживані для захисту внутрішніх систем від впливу ЕМІБ.

ПРИМІТКА – СЗЕМІБ є частиною загального блискавкозахисту.

Система защиты от ЭМИМ (СЗЭМИМ) – Меры, предпринимаемые для защиты внутренних систем от воздействия ЭМИМ.

ПРИМЕЧАНИЕ – СЗЭМИМ является частью общей молниезащиты.

100) IEC 62305-1:2010, 3.52

IEC 62305-2:2010, 3.1.42

Magnetic shield – Closed, metallic, grid-like or continuous screen enveloping the structure to be protected, or part of it, used to reduce failures of electrical and electronic systems.

Магнітний екран – Замкнений металевий сітчастий або суцільний екран, який охоплює об'єкт, що захищається, або його частину, з метою скорочення ушкоджень електричних та електронних систем.

Магнитный экран – Замкнутый металлический сеточный или сплошной экран, охватывающий защищаемый объект или его часть, предназначенный для сокращения повреждений электрических и электронных систем.

101) IEC 62305-4:2010, 3.12

Grid-like spatial shield – Magnetic shield characterized by openings.

NOTE – For a building or a room, it is preferably build by interconnected natural metal components of the structure (e.g. rods of reinforcement in concrete, metal frames and metal supports).

Сітчастий просторовий екран – Магнітний екран, який характеризується отворами.

ПРИМІТКА – У будинках або приміщеннях такий екран створюється, переважно, взаємоз'язаними природними металевими компонентами об'єкта (наприклад, арматурні стрижні в бетоні, металеві каркаси та опори).

Сеточный пространственный экран – Магнитный экран, характеризуемый отверстиями.

ПРИМЕЧАНИЕ – В зданиях или помещениях такой экран создается, преимущественно, взаимосвязанными естественными металлическими компонентами объекта (например, арматурные стержни в бетоне, металлические каркасы и опоры).

102) IEC 62305-4:2010, 3.14

Bonding network – Interconnecting network of all conductive parts of the structure and of internal systems (live conductors excluded) to the earth-termination system.

З'єднувальна мережа – Мережа, що приєднує всі провідні частини об'єкта та його внутрішніх сис-

тем (окрім струмовідних провідників) до системи заземлювачів.

Соединительная сеть – Сеть, присоединяющая все проводящие части объекта и его внутренних систем (исключая токоведущие проводники) к системе заземлителей.

103) IEC 62305-4:2010, 3.15

Earthing system – Complete system combining the earth-termination system and the bonding network.

Система заземлення – Повна система, що поєднує систему заземлювачів та з'єднувальну мережу.

Система заземлення – Полная система, объединяющая систему заземлителей и соединительную сеть.

104) IEC 62305-1:2010, 3.53

IEC 62305-2:2010, 3.1.45

IEC 62305-3:2010, 3.29

IEC 62305-4:2010, 3.16

Surge protective device (SPD) – Device intended to limit transient overvoltages and divert surge currents; contains at least one non-linear component.

Пристрій захисту від сплесків (ПЗС) – Пристрій, призначений для обмеження перехідних перенапруг й відводу надструмів; містить хоча б один нелінійний компонент.

Устройство защиты от всплесков (УЗВ) – Устройство, предназначенное для ограничения переходных перенапряжений и отвода сверхтоков; содержит хотя бы один нелинейный компонент.

105) IEC 62305-4:2010, 3.17

SPD tested with I_{imp} – SPDs which withstand the partial lightning current with a typical waveform 10/350 μ s and require a corresponding impulse test current I_{imp} .

NOTE – For power lines a suitable test current I_{imp} is defined in the Class I test procedure of IEC 61643-1:2005.

ПЗС, випробуваний I_{imp} – ПЗС, які витримують частковий струм блискавки типової форми 10/350 мкс та підлягають відповідним випробуванням імпульсним струмом I_{imp} .

ПРИМІТКА – Для силових ліній застосовний випробувальний струм I_{imp} визначається за Класом I випробувальної процедури згідно IEC 61643-1:2005.

УЗВ, испытанное I_{imp} – УЗВ, которые выдерживают частичный ток молнии типовой формы 10/350 мкс и подлежат соответствующим испытаниям импульсным током I_{imp} .

ПРИМЕЧАНИЕ – Для силовых линий применимый испытательный ток I_{imp} определяется по Классу I испытательной процедуры согласно IEC 61643-1:2005.

106) IEC 62305-4:2010, 3.18

SPD tested with I_n – SPDs which withstand induced surge currents with a typical waveform 8/20 μ s and require a corresponding impulse test current I_n .

NOTE – For power lines a suitable test current I_n is defined in the Class II test procedure of IEC 61643-1:2005.

ПЗС, випробуваний I_n – ПЗС, які витримують індуковані сплески струму типової форми 8/20 мкс та підлягають відповідним випробуванням імпульсним струмом I_n .

ПРИМІТКА – Для силових ліній застосовний ви-

пробувальний струм I_n визначається за Класом II випробувальної процедури згідно IEC 61643-1:2005.

УЗВ, испытанное I_n – УЗВ, которые выдерживают индуцированные всплески тока типичной формы 8/20 мкс и подлежат соответствующим испытаниям импульсным током I_n .

ПРИМЕЧАНИЕ – Для силовых линий применяемый испытательный ток I_n определяется по Классу II испытательной процедуры согласно IEC 61643-1:2005.

107) IEC 62305-4:2010, 3.19

SPD tested with a combination wave – SPDs that withstand induced surge currents with a typical waveform 8/20 μ s and require a corresponding impulse test current I_{sc} .

NOTE – For power lines a suitable combination wave test is defined in the Class III test procedure of IEC 61643-1:2005 defining the open circuit voltage U_{oc} 1,2/50 μ s and the short-circuit current I_{sc} 8/20 μ s of a 2 Ω combination wave generator.

ПЗС, випробуваний комбінованою хвилею – ПЗС, які витримують індуковані сплески струму типової форми 8/20 мкс та підлягають відповідним випробуванням імпульсним струмом I_{sc} .

ПРИМІТКА – Для силових ліній застосовна комбінована випробувальна хвиля визначається за Класом III випробувальної процедури згідно IEC 61643-1:2005, яка визначає напругу холостого ходу U_{oc} 1,2/50 мкс та струм короткого замикання I_{sc} 8/20 мкс для генератора комбінованої хвилі з внутрішнім опором 2 Ом.

УЗВ, испытанное комбинированной волной – УЗВ, которые выдерживают индуцированные всплески тока типичной формы 8/20 мкс и подлежат соответствующим испытаниям импульсным током I_{sc} .

ПРИМЕЧАНИЕ – Для силовых линий применяемая комбинированная испытательная волна определяется по Классу III испытательной процедуры согласно IEC 61643-1:2005, которая определяет напряжение холостого хода U_{oc} 1,2/50 мкс и ток короткого замыкания I_{sc} 8/20 мкс для генератора комбинированной волны с внутренним сопротивлением 2 Ом.

108) IEC 62305-4:2010, 3.20

Voltage-switching type SPD – SPD that has a high impedance when no surge is present, but can have a sudden change in impedance to a low value in response to a voltage surge.

NOTE 1 – Common examples of components used as voltage switching devices include spark gaps, gas discharge tubes (GDT), thyristors (silicon controlled rectifiers) and triacs. These SPDs are sometimes called 'crowbar type'.

NOTE 2 – A voltage-switching device has a discontinuous voltage/current characteristic.

ПЗС перемикаючого типу – ПЗС, який має високий імпеданс при відсутності сплеску, але може різко зменшити імпеданс при появі сплеску.

ПРИМІТКА 1 – Загальновідомими прикладами компонентів перемикаючого типу є іскрові розрядники, газорозрядні трубки (ГРТ), тиристори (керовані кремнієві вентиля), симистори (симетричні триодні тиристори). Такі ПЗС інколи називають «перемичка на

землю».

ПРИМІТКА 2 – ПЗС перемикаючого типу мають розривну вольт-амперну характеристику.

УЗВ переключаючого типу – УЗВ, которое имеет высокий импеданс при отсутствии всплеска, но может резко уменьшить импеданс при появлении всплеска.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 – Общеизвестными примерами компонентов переключающего типа являются искровые разрядники, газоразрядные трубки (ГРТ), тиристоры (управляемые кремниевые вентили), симисторы (симметричные триодные тиристоры). Такие УЗВ иногда называют «перемычка на землю».

ПРИМЕЧАНИЕ 2 – УЗВ переключающего типа имеют разрывную вольт-амперную характеристику.

109) IEC 62305-4:2010, 3.21

Voltage-limiting type SPD – SPD that has a high impedance when no surge is present, but will reduce it continuously with increased surge current and voltage.

NOTE 1 – Common examples of components used as non-linear devices are varistors and suppressor diodes. These SPDs are sometimes called 'clamping type'.

NOTE 2 – A voltage-limiting device has a continuous voltage/current characteristic.

ПЗС обмежувачого типу – ПЗС, який має високий імпеданс при відсутності сплеску, але зменшує імпеданс безперервно при появі сплеску струму та напруги.

ПРИМІТКА 1 – Загальновідомими прикладами компонентів обмежувачого типу є варистори та супресори. Такі пристрої інколи називають «обмежувачі».

ПРИМІТКА 2 – ПЗС обмежувачого типу мають безперервну вольт-амперну характеристику.

УЗВ обмежувачого типу – УЗВ, которое имеет высокий импеданс при отсутствии всплеска, но уменьшает импеданс непрерывно с появлением всплеска тока и напряжения.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 – Общеизвестными примерами компонентов ограничивающего типа являются варисторы и супресоры. Такие устройства иногда называют «ограничители».

ПРИМЕЧАНИЕ 2 – УЗВ ограничивающего типа имеют непрерывную вольт-амперную характеристику.

110) IEC 62305-4:2010, 3.22

Combination type SPD – SPD that incorporates both voltage-switching and voltage-limiting type components and that may exhibit voltage-switching, voltage-limiting or both voltage-switching and voltage-limiting behavior, depending upon the characteristics of the applied voltage.

ПЗС змішаного типу – ПЗС, який поєднує компоненти перемикаючого та обмежувачого типів та може поводитись як перемикаючий або обмежувачий, або перемикаючий та обмежувачий в залежності від характеристик напруги, що прикладається.

УЗВ змішаного типу – УЗВ, которое объединяет компоненты переключающего и ограничивающего типов и может вести себя либо как переключающее, либо как ограничивающее, либо как переключающее и ограничивающее в зависимости от характеристик прикладываемого напряжения.

111) IEC 62305-1:2010, 3.54

IEC 62305-2:2010, 3.1.46

IEC 62305-4:2010, 3.23

Coordinated SPD system – SPDs properly selected, coordinated and installed to form a system intended to reduce failures of electrical and electronic systems.

Скоординована система ПЗС – Система вірно вибраних, погоджених і встановлених ПЗС, призначена для зменшення кількості ушкоджень електричних та електронних систем.

Скоординированная система УЗВ – Система правильно выбранных, согласованных и установленных УЗВ, предназначенная для уменьшения количества поврежденных электрических и электронных систем.

112) IEC 62305-1:2010, 3.56

IEC 62305-2:2010, 3.1.47

IEC 62305-3:2010, 3.36

IEC 62305-4:2010, 3.24

Isolating interfaces – Devices which are capable of reducing conducted surges on lines entering the LPZ.

NOTE 1 – These include isolation transformers with earthed screen between windings, metal free fibre optic cables and opto-isolators.

NOTE 2 – Insulation withstand characteristics of these devices are suitable for this application intrinsically or via SPD.

Розділові пристрої – Пристрої, здатні зменшити кондуктивні сплески в лініях, що входять в ЗБЗ.

ПРИМІТКА 1 – Розділовими пристроями є розділові трансформатори з заземленим екраном між обмотками, оптоволоконні кабелі без металевих оболонок та оптрони.

ПРИМІТКА 2 – Характеристики, що витримуються ізоляцією цих пристроїв, придатні для використання безпосередньо або через ПЗС.

Разделительные устройства – Устройства, способные уменьшить кондуктивные всплески в линиях, входящих в ЗМЗ.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 – Разделительными устройствами являются разделительные трансформаторы с заземленным экраном между обмотками, оптоволоконные кабели без металлических оболочек и оптрони.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 – Характеристики, выдерживаемые изоляцией этих устройств, пригодны для применения непосредственно или через УЗВ.

Выводы.

1. Предложенный перевод терминов и определенный стандартов серии ДСТУ EN 62305-X:2012 по молниезащите требует согласования со всеми заинтересованными организациями с целью предотвращения неоднозначности прочтения их на разных языках.

2. Целесообразно отменить действие стандарта ДСТУ Б В.2.5-38:2008 или привести его по форме и содержанию к стандартам серии ДСТУ EN 62305-X:2012.

Список литературы: 1. IEC 62305-1:2010 Protection against lightning – Part 1: General principles (Захист від блискавки – Частина 1: Основні принципи) (Защита от молнии – Часть 1: Основные принципы). – 72 с. 2. IEC 62305-2:2010 Protection against lightning –

Part 2: Risk management (Захист від блискавки – Частина 2: Оцінка ризику) (Защита от молнии – Часть 2: Оценка риска) – 88 с. **3.** IEC 62305-3:2010 Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard (Захист від блискавки – Частина 3: Фізичне ушкодження об'єктів та загроза життю) (Защита от молнии – Часть 3: Физическое повреждение объектов и угроза жизни) – 160 с. **4.** IEC 62305-4:2010 Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures (Захист від блискавки – Частина 4: Електричні та електронні системи усередині об'єкту) (Защита от молнии – Часть 4: Электрические и электронные системы внутри объектов) – 92 с. **5.** ДСТУ Б В.2.5-38:2008 Національний стандарт України. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (IEC 62305:2006, NEQ) – 47 с. **6.** *Глебов О. Ю.* К выбору метода расчета зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода / *О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Д. Г. Колюшко, Г. М. Колюшко* // Энергетика та електрифікація. – 2015. – № 4. – С. 25-32.

Osnovni principi) (Zashhita ot molnii – Chast' 1: Osnovnye principy) 72. Print. **2.** IEC 62305-2:2010 Protection against lightning – Part 2: Risk management (Zahist vid bliskavki – Chastina 2: Ocinka riziku) (Zashhita ot molnii – Chast' 2: Ocenka riska) 88. Print. **3.** IEC 62305-3:2010 Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard (Zahist vid bliskavki – Chastina 3: Fizichne ushkodzhennja ob'ektiv ta zagroza zhittju) (Zashhita ot molnii – Chast' 3: Fizicheskoe povrezhdenie ob'ektiv i ugroza zhizni) 160. Print. **4.** IEC 62305-4:2010 Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures (Zahist vid bliskavki – Chastina 4: Elektrichni ta elektronni sistemi useredini ob'ektu) (Zashhita ot molnii – Chast' 4: Jelektricheskie i jelektronnye sistemy vnutri ob'ektiv) 92. Print. **5.** DSTU B V.2.5-38:2008 Natsional'nyy standart Ukrayiny. Inzhenerne obladnannya budynkiv i sporud. Ulashtuvannya blyskavkozahystu budivvel' i sporud (IEC 62305:2006, NEQ) 47. Print. **6.** Glebov O. Ju., Kiprich S. V., Koliushko D. G., Koliushko G. M. K vyboru metoda rascheta zony zashhity odinochnogo sterzhnevogo molnieotvoda. Energetika ta elektrifikacija. 2015. No 4. 25-32. Print.

Bibliography (transliterated): 1. IEC 62305-1:2010 Protection against lightning – Part 1: General principles (Zahist vid bliskavki – Chastina 1:

Поступила (received) 22.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Глебов Олег Юрьевич – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», старший научный сотрудник, тел.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Glyebov Oleg Yuriyovich – Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", senior staff scientist, tel.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Киприч Светлана Викторовна – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», научный сотрудник, тел.: (057) 707-62-80; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Kiprych Svitlana Viktorivna – Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", scientist, tel.: (057) 707-62-80; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Колюшко Денис Георгиевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «ХПИ», старший научный сотрудник кафедры автоматизированных электромеханических систем, тел.: (057) 707-64-45; e-mail: den@kpi.kharkov.ua.

Koliushko Denys Georgiyovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior staff scientist, National Technical University "KhPI", senior staff scientist at the Department of Automatic electromechanical systems, tel.: (057) 707-64-45; e-mail: den@kpi.kharkov.ua.

Колюшко Георгий Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», ведущий научный сотрудник, тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Koliushko Georgiy Mykchailovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior staff scientist, Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", principal scientist, tel.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5_molniya@ukr.net.

Резинкина Марина Михайловна – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины», ведущий научный сотрудник, тел.: (0572) 99-11-76; e-mail: rezinkina@nas.gov.ua.

Rezinkina Maryna Mykchailivna – Doctor of Technical Sciences, senior staff scientist, State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine", principal scientist, tel.: (0572) 99-11-76; e-mail: rezinkina@nas.gov.ua.

УДК 621.317.318

В.В. КНЯЗЕВ, В.Н. ДРОНОВ**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВА УДАРОВ МОЛНИИ В ОБЪЕКТ**

Представлены результаты расчетной оценки количества ожидаемых разрядов молнии в конструкцию типа ангара, проведенные двумя методами: с использованием прикладной программы «Вероятность», разработанной авторами, и формул «3Н» из действующих стандартов. В программе реализован электрогеометрический метод (EGM), который является базовым при оценке зон защиты молниеприемников. Расчеты проведены с учетом статистического распределения амплитуд токов молнии в соответствии с параметрами заданными в стандарте в стандарте ДСТУ EN 62305-1:2012. Рассмотрен диапазон силы тока молнии (2 – 200) кА, что соответствует I уровню молниезащиты. Вероятность того, что сила тока молнии превысит значение 200 кА не более 1 %. Формулы «3Н», применяемые для оценки «площади стягивания» дают завышенный в несколько раз (для рассмотренного объекта в 2,67 раза) результат, поскольку не учитывают реальную форму объекта и статистическое распределение силы тока молнии, определяющего радиус катящейся сферы в EGM методе

Ключевые слова: молния, сила тока, статистическое распределение вероятности, электрогеометрический метод, число ударов молнии, прикладное программное обеспечение.

Введение. Определение требуемого уровня системы молниезащиты объектов базируется на оценке вероятности возникновения ущерба и возможных жертв в случае удара молнии в объект. Метод такой оценки регламентируется стандартом [1]. Важным исходным положением является оценка количества молниевых разрядов, которые попадут в объект в течение заданного времени эксплуатации. Стандарт [1] учитывает все основные факторы, влияющие на этот процесс. В том числе: габаритные размеры объекта, значение частоты ударов молнии в землю в районе расположения объекта, наличие окружающих объект высотных зданий и сооружений. Эффективную площадь «стягивания» для объекта в виде параллелепипеда с габаритными размерами $L \times W \times H$ определяют, как показано на рис. 1.

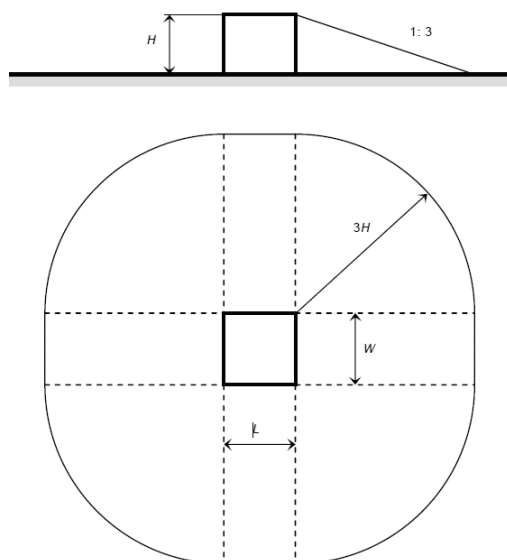


Рисунок 1 – Определение площади стягивания молний объектом по методу «3Н» [1]

Представленный метод базируется на эмпирических данных, полученных в основном для высотных сооружений. Естественно, возникает вопрос: почему 3Н? Современные знания о физике молнии трансформированы в практические рекомендации, которые

сконцентрированы в стандарте МЭК [2] и публикации СИГРЕ [3]. Важными для рассматриваемой задачи положениями являются такие:

- расстояние, с которого лидер молнии ориентируется на объект однозначно связано с величиной силы тока главного разряда (фактически с величиной напряжения грозового облака). Это утверждение обосновывает метод «катящейся сферы», который сегодня считается наиболее достоверным при определении зон защиты молниеприемников;

- вероятность появления молнии с силой тока, превышающей заданную величину, определена на основании обработки большого числа экспериментальных данных.

Очевидно, что площадь «стягивания» однозначно связана с радиусом катящейся сферы и габаритными размерами объекта. Следовательно, можно достаточно точно в рамках сформулированной модели оценить размеры площади стягивания и сравнить их с результатами по эмпирическому методу «3Н». В ряде работ [4-6], представлены некоторые полученные результаты.

Целью работы является доказательство эффективности использования электрогеометрического метода для оценки количества ожидаемых разрядов молний в объект в течение заданного времени.

Постановка задачи. Объект имеет форму ангара, кровля которого является частью цилиндрической поверхности. Кровля выполнена из листов металла. При оценке количества ожидаемых разрядов молний в объект принять конкретные числовые значения габаритных размеров объекта и плотность разрядов молнии.

Методы исследования. Для расчетной оценки использован электрогеометрический метод (ЭГМ) с учетом статистического распределения амплитуд токов молнии в соответствии с параметрами заданными в стандарте IEC 62305-1:2010 [2]. Реализуемая в программе вычислительная модель описана далее.

Имеется исследуемый объект, представляющий собой территорию, на которой размещены элементы

объекта (строения). Пробивное расстояние, соответствует радиусу «катящейся сферы», определяется по заданному значению силы тока молнии следующей формулой [2]:

$$R = k \cdot I^c, \quad (1)$$

где R , м – пробивное расстояние (радиус сферы) в методе EGM; I , кА – сила тока молнии; k и c – константы, равные: 10,0 и 0,65, соответственно [2–3].

С некоторым шагом на поверхности земли задается сетка. Если по оси X узлы сетки индексировать значением i , а по оси Y – значением j , то произвольный узел сетки обозначается как (i, j) . Для каждого узла сетки определяется максимальная высота, при которой «катящаяся сфера» касается земли или – для любого строения – любой точки, проекция на землю для которой соответствует любому узлу сетки. Эта высота пропорциональна количеству поражений молнией той точки земли или строения, для которой зафиксировано касание.

Если таких точек несколько – обозначим их количество как k – то, полагая, что из данного центра «катящейся сферы» они будут поражаться равновероятно, делается вывод, что количество поражений молнией любой из этих точек будет в k раз меньше.

Если для узла сетки (i, j) определено, что при расположении центра «катящейся сферы» над этим узлом на высоте ${}_{ij}h$ имеет место только поражение точки строения, проекция которой соответствует узлу сетки (m, n) , то характеристика поражения такой точки сооружения обозначена как ${}_{ij}H_{mn}$ и справедливо (2):

$${}_{ij}H_{mn} = {}_{ij}h. \quad (2)$$

Если для узла сетки (i, j) определено, что при расположении центра «катящейся сферы» над этим узлом на высоте ${}_{ij}h$ имеет место только поражение земли в этом узле сетки, то характеристика поражения такой точки сооружения обозначается как ${}_{ij}H$ и справедливо равенство (3):

$${}_{ij}H = {}_{ij}h. \quad (3)$$

Если для узла сетки (i, j) определено, что при расположении центра «катящейся сферы» над этим узлом на высоте ${}_{ij}h$ могут быть поражены k точек строений или узловая точка земли, то справедливо (4):

$${}_{ij}H = {}_{ij}H_{mn} = \frac{{}_{ij}h}{k}. \quad (4)$$

Тогда H_{mn} – суммарная характеристика поражения точки сооружения, проекция которой соответствует узлу сетки (m, n) , определяется формулой (5):

$$H_{mn} = \sum_i \sum_j {}_{ij}H_{mn}. \quad (5)$$

Суммарный показатель поражения всех точек объекта H определяется в соответствии с формулой (6):

$$H = \sum_m \sum_n (H_{mn} + {}_{mn}H). \quad (6)$$

На основании полученных показателей может быть вычислена p_{ij} – оценка вероятности поражения молнией для узла сетки (i, j) в соответствии с (7):

$$p_{ij} = \frac{{}_{ij}H + H_{ij}}{H}. \quad (7)$$

В дальнейшем, зная значения оценки вероятно-

стей поражения молнией для всех узлов сетки, можно вычислять все необходимые нам вероятностные оценки.

С этой целью определяется ряд статистических показателей для некоторых элементов сооружений.

В рамках решаемой задачи рассмотрен только вариант троса, поскольку поверхность объекта моделируется системой 75 тросов.

Элементами троса являются:

– его конечные точки (края);

– неконечные точки (точки средней части троса).

Для конечных точек троса вероятности их поражения, которые обозначим как ${}_{\tau}p_1$ и ${}_{\tau}p_2$, определяются в соответствии с формулой (7).

Кроме этого вычисляется вероятность поражения средней части троса. С этой целью для средней части троса в процессе моделирования фиксируется некоторое множество точек (${}_{\tau}n \geq 1$), размещенных вдоль троса таким образом, что расстояние между ними и от углов троса к ближайшим «средним» точкам не превышает выбранного шага сетки. Для каждой из этих точек в процессе моделирования определяется характеристика ее поражения, а затем, в соответствии с (7), вычисляется вероятность ее поражения. Вероятность поражения i -й точки средней части троса обозначим как ${}_{\tau}p_{ci}$.

Сумма вероятностей поражения средних точек троса, вычисляемая в соответствии с (8) образует суммарную вероятность поражения средней зоны троса (${}_{\tau}p_c$).

$${}_{\tau}p_c = \sum_{i=1}^{{}_{\tau}n} {}_{\tau}p_{ci}. \quad (8)$$

Тогда полная вероятность поражения троса (${}_{\tau}p$) определяется в соответствии с (9):

$${}_{\tau}p = {}_{\tau}p_c + {}_{\tau}p_1 + {}_{\tau}p_2. \quad (9)$$

Теперь условные вероятности поражения элементов троса при условии его поражения, можно вычислить в соответствии с (10):

$$\left. \begin{aligned} {}_{\tau}p_c^y &= \frac{{}_{\tau}p_c}{{}_{\tau}p} \\ {}_{\tau}p_i^y &= \frac{{}_{\tau}p_i}{{}_{\tau}p} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где ${}_{\tau}p_c^y$ – условная вероятность поражения средней зоны троса при условии поражения самого троса; ${}_{\tau}p_i^y$ – условная вероятность поражения i -й конечной точки троса при условии поражения самого троса.

Программа предполагает, что закон распределения тока молнии описывается следующей моделью:

Вероятность P того, что пиковое значение тока молнии превысит значение I , определяется в соответствии с формулой (11) [1, 3]:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{a}\right)^b}, \quad (11)$$

где: P – искомая вероятность; I – граничное значение тока молнии [кА]; a и b – неотрицательные параметры, имеющие в соответствии с [1, 3] следующие зна-

чения: $a = 31[\text{kA}]$, $b = 2,6$.

Значения параметров a и b могут, как иметь указанные выше значения по умолчанию, так и значения по желанию пользователя программы.

Кроме перечисленных элементов модели в программе обеспечивается вычисление радиуса "катящейся сферы" (R) в соответствии с формулой (1).

В случае необходимости предусмотрена возможность выбрать режим исследования с непосредственным заданием числового значения радиуса «катящейся сферы». Этот режим принципиально важен для использования программного обеспечения при анализе результатов лабораторных исследований, когда длина модельной молнии не превышает 10 м.

Результаты численного моделирования. Оценим значение вероятности поражения объекта в течение одного года эксплуатации. Габаритные размеры объекта в виде ангара, примем по аналогии с работой [5], такими: ширина 250 м, длина 165 м, высота 110 м. Для определенности задана плотность разрядов молнии $n = 4,69$ разрядов/(год·км²), характерная для районов центральной Украины. Для описания поверхности объекта, в данном случае, удобно применить комбинацию тросовых молниеприемников. Моделирование выполнено 75-ю горизонтальными тросами, с заземляющими спусками, в том числе:

- средний (по гребню укрытия);
- правый и левый на грунте;
- промежуточные с шагом не более 5 м.

Изображение тросовой модели представлено на рис. 2. Для удобства анализа полученных результатов, объект размещен на участке земли квадратной формы площадью 1 км².

Расчетная оценка произведена с использованием разработанной авторами прикладной программы [7], в которой реализован электрогеометрический метод, с учетом статистического распределения амплитуд токов молнии в соответствии с параметрами, заданными в стандарте IEC 62305-1:2010 [2]. Рассмотрен диапазон силы тока молнии (2 – 200) кА. В соответствии с IEC 62305-1:2010 (таблица А.3), вероятность того, что сила тока молнии выйдет за пределы указанного диапазона не более 2 %. Результаты расчетов для двух вариантов расчетной сетки представлены в таблице 1. Пример иллюстрации результатов в виде 2D изображения с зонами равной вероятности установленного цвета, представлен на рис. 3, а в варианте 3D – на рис. 4.

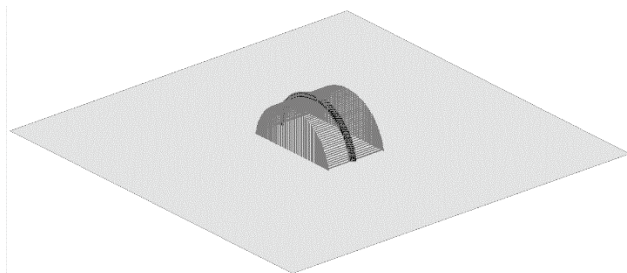


Рисунок 2 – Модель объекта в виде 75 горизонтальных тросов с соответствующим заземляющими спусками, расположенного на площади 1 км² (темная полоса по средней линии – номера тросов, физического смысла не имеет)

Таблица 1 Результаты расчетной оценки:

Диапазон тока, кА	Вероятность удара в землю	Вероятность удара в укрытие	Количество ударов в год	Шаг расчетной сетки, м
2 – 200	0,7522	0,2478	1,162	2,500
2 – 200	0,7519	0,2481	1,164	0,314

Примечание: Расчеты проведены для двух вариантов шага расчетной сетки, отличающихся между собой в 8 раз. Результаты в обоих случаях практически одинаковые (отличие менее чем на 0,2 %).

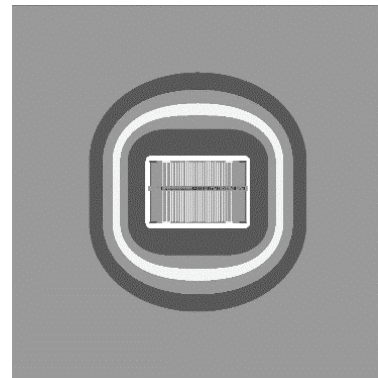


Рисунок 3 – Распределение вероятности поражения объекта и земли на участке площадью 1 км²

Следует отметить, что определение относительной вероятности удара осуществляется по каждому объекту отдельно (в рассматриваемом случае это объект и земля). Поэтому, максимальные значения находятся как на поверхности объекта, так на земле вдали от него (в черно-белом изображении информативность рисунка 3 низкая).

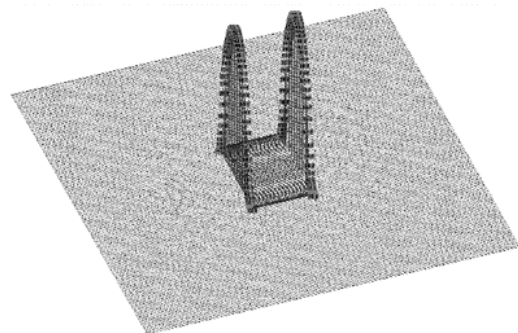


Рисунок 4 – 3D изображение распределения вероятности ударов молнии в объект

Результаты расчетной оценки таковы:

Количество ожидаемых разрядов молнии в объект 1,16 в год. Следовательно, за 100 лет эксплуатации число ударов молнии в объект составит 116. Погрешность оценки в пределах +3%.

Сравним полученный результат с результатами по стандартизированной методике [1]. В стандарте IEC 62305-2 [1, формула А.2] представлена формула (12), которая позволяет оценить площадь зоны возможного стягивания молний для изолированного сооружения в виде параллелепипеда с длиной L , шириной W , и высотой H , расположенного на равнинной местности, в соответствии с рис. 1.

$$A_d = L \cdot W + 6 H (L + W) + 9\pi (H)^2. \quad (12)$$

Значения габаритных размеров совпадают с приведенными выше для ангара. В этом случае, значение $A_d = 660214 \text{ м}^2$ или 0,66 часть от числа ударов в площадь 1 км^2 . С учетом средней плотности $n = 4,69$ разрядов/(год·км²), число ударов молнии в объект оценивается величиной 3,095 в год. Следовательно, на протяжении 100 лет ожидается 310 ударов молнии, что в 2,67 раза больше числа ударов, рассчитанных выше с помощью прикладной программы. Следует отметить, что наличие существенной разницы между результатами оценки числа ударов молнии в объект по стандартизированной методике и методике, учитывающей статистическое распределение, отмечены также в работах [5, 6].

Причины отличия обуславливаются следующими обстоятельствами:

- стандартизированная методика не учитывает реальную форму объекта, отличную от параллелепипеда;
- стандартизированная методика не учитывает статистического распределения силы тока молнии;
- стандартизированная методика основана на результатах экспериментальных исследований, полученных в основном для объектов типа мачта или стержень.

Выводы. Расчетная оценка количества ожидаемых разрядов молнии в объект произведена с использованием прикладной программы [7]. В программе реализован электрогеометрический метод (EGM), который является базовым в стандарте IEC 62305-1:2010 [2]. Расчеты проведены с учетом статистического распределения амплитуд токов молнии в соответствии с параметрами заданными в упомянутом выше стандарте. Рассмотрен диапазон силы тока молнии (2 – 200) кА, что соответствует I уровню молниезащиты. В соответствии с IEC 62305-1:2011 (таблица А.3), вероятность того, что сила тока молнии превысит значение 200 кА не более 1 %.

Доказано, что используемые в разделе А.2.1. стандарта IEC 62305-2:2012 формулы для оценки «площади стягивания» дают завышенный в несколько раз результат (в рассмотренном случае в 2,67 раза),

поскольку не учитывают реальную форму объекта и статистическое распределение силы тока молнии, определяющего радиус катящейся сферы в EGM методе. Кроме того, из рис. 4 очевидно, что вероятность удара молнии по поверхности объекта распределена неравномерно. Значительная часть сконцентрирована вблизи торца объекта. Следовательно, целесообразно эту часть поверхности объекта выполнить из листового металла толщиной большей, чем среднюю зону.

Список литературы: 1. IEC 62305-2: 2010. Protection against lightning – Part 2: Risk management. 2. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning – Part 1: General principles. 3. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications. 4. Cooray V. On the possible variation of the lightning striking distance as assumed in the IEC lightning protection standard as a function of structure height / V. Cooray, U. Kumar, F. Rachidi, C. Nucci // Electric power systems research. – 2014. – Vol. 113. – P. 79-87. 5. Shostak V. Statistical Distributions of Current Amplitudes and Lightning Incidence Number to Structures of Various Configurations / V. Shostak, V. Tyulyukov // Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China. – P. 1289–1296. 6. Gao Lei How to Calculate the Collection Area of Non-isolated Structure / Gao Lei, Ye Yisong // Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China. – P. 280-285. 7. Дронов В.Н. Компьютерная программа «Расчет вероятностей уровней молниезащиты зданий и сооружений» / В.Н. Дронов, В.В. Князев // Свидетельство о регистрации авторского права № 60092 от 09.06.2015. Выдано государственной службой интеллектуальной собственности Украины.

Bibliography (transliterated): 1. IEC 62305-2: 2010. Protection against lightning – Part 2: Risk management. Print. 2. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning – Part 1: General principles. Print. 3. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications. Print. 4. Cooray V. On the possible variation of the lightning striking distance as assumed in the IEC lightning protection standard as a function of structure height. V. Cooray, U. Kumar, F. Rachidi, C. Nucci. Electric power systems research. 2014. Vol. 113. 79-87. Print. 5. Shostak V. Statistical Distributions of Current Amplitudes and Lightning Incidence Number to Structures of Various Configurations. V. Shostak, V. Tyulyukov. Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China. 1289-1296. Print. 6. Gao Lei How to Calculate the Collection Area of Non-isolated Structure. Gao Lei, Ye Yisong. Proc. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China. 280-285. Print. 7. Dronov V.N. Komp'juternaja programma «Raschet veroyatnostej urovnej molniezashhity zdanij i sooruzhenij». V.N. Dronov, V.V. Kniaziev. Svidetel'stvo o registracii avtorskogo prava No 60092 ot 09.06.2015. Vydano gosudarstvennoj sluzhboj intellektual'noj sobstvennosti Ukrainy. Print.

Посмунила (received) 8.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Князев Владимир Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», ведущий научный сотрудник; тел.: (057) 707 68 68; email: knyaz2@i.ua.

Kniaziev Volodymyr Volodymyrovych, Ph.D., Senior Research Fellow, Research & Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", leading researcher; Phone: (38057) 707 68 68; email: knyaz2@i.ua.

Дронов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «ХПИ», доцент кафедры «Системы информации», тел.: (057) 719 90 77

Dronov Volodymyr Mykolaiovych, Ph.D., Associate Professor, National Technical University "KhPI", associate professor of "Information Systems" department, Phone: +(38057) 719 90 77

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, А.А СЕРКОВ, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, И.В ЯКОВЕНКО**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

Проведен анализ влияния внешних электромагнитных полей на работоспособность полупроводниковых приборов. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, бесстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Степень влияния внешних электромагнитных полей на работоспособность ЭРИ неодинакова. К наиболее чувствительным относятся полупроводниковые приборы (ППП) и интегральные микросхемы (ИМС) [1]. Основные отказы этих изделий связаны с электрическими (влияющими на величину и распределение токов в структуре приборов) и тепловыми (определяющими повышение температуры отдельных участков этой структуры) [2]. Поэтому наиболее существенное влияние на работоспособность этих изделий оказывают импульсные напряжения наведенные ЭМИ на электрически связанных с ними соединительных линиях.

Моделирование механизмов возникновения необратимых отказов, возникающих вследствие взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой),

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния электромагнитного излучения (ЭМИ) на радиоизделия относятся к области необратимых отказов (как известно, все типы отказов, возникающие в электрорадиоизделиях принято разделять на обратимые и необратимые [1,2]). Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности изделия. Они наступают в случае, когда изменение рабочих характеристик аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего электромагнитного необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового пробоя комплектующих).

В тоже время, для обратимых отказов, характеризуемых временной утратой работоспособности, использование теории цепей не позволяет определять искажения выходных характеристик радиоизделий. Поэтому, большинство вопросов, связанных с определением механизмов обратимых отказов, связанных с влиянием наведенных токов на работоспособность изделия в области обратимых отказов остаются от-

крытыми.

Анализ причин отказов и выхода из строя технических средств (ТС) показал [2], что непосредственное воздействие электромагнитных полей с уровнями напряженности электрического поля до 100 кВ/м и магнитных полей до 600 А/м, как правило, не приводит к структурным повреждениям материалов изделий электронной техники и тем самым не вызывает остаточных изменений (деградации) их параметров. Таким образом, данный уровень параметров электромагнитных полей ограничивает область необратимых отказов.

Цель работы. В статье исследуются основные характеристики, определяющие степень влияния импульсных электромагнитных полей на работоспособность полупроводниковых приборов комплектующих электрорадиоизделия.

Постановка задачи. Следует отметить, что воздействие на простейшие типовые схемы радио- и электротехнического оборудования ТС, содержащих полупроводниковые приборы и микросхемы, электрических полей с напряженностью порядка 20 кВ/м и магнитных – 100 А/м уже сопровождается кратковременными (обратимыми) нарушениями их работоспособности [1, 2].

Импульсная электрическая прочность является основной характеристикой, определяющей предел работоспособности ППП (область **необратимых отказов**) при воздействии наведенных импульсных токов и напряжений, вызванных ЭМИ [8]. Для ППП данный параметр определяется как наибольшее значение обратного напряжения и соответствующего ему обратного тока, предшествующее перекрытию р-п перехода. Как правило, данный параметр определяет тот количественный предел эксплуатационных характеристик ППП, после которого наблюдается деградация прибора. При этом основной причиной отказа полупроводниковых приборов является **вторичный тепловой пробой**, который наблюдается во всех типах полупроводниковых приборов [7].

© В.И. Кравченко, А.А Серков, В.С. Бреславец, И.В Яковенко, 2015

Вторичный тепловой пробой р-п-переходов ППП при прямом смещении является результатом тепловой нестабильности в локализованных областях полупроводниковой структуры, которая возникает при неравномерности распределения тока по структуре. При обратном смещении р-п-переходов возникновение вторичного пробоя является результатом появления лавинного тока при высоких напряжениях и его связывают с локальным перегревом в области р-п-перехода.

Наиболее критичными к воздействию импульсных токов и напряжений являются обратно смещенные р-п-переходы приборов. Это обусловлено очень маленькими размерами активных областей и большой тепловой постоянной времени для материалов [7,8]. Так как большое количество энергии рассеивается в окрестностях активных областей р-п-переходов и тепловая постоянная времени является очень большой по сравнению с длительностью импульса ЭМИ, тепло под действием ЭМИ выделяется на малой площади, а температура в этой области становится довольно высокой вплоть до температуры плавления материалов. Это приводит к появлению между переходом и смежными областями возникает большой температурный градиент, то есть повреждениям, вызванным плавлением материалов, и тепловому пробую.

Стойкость полупроводниковых приборов к действию импульсных перегрузок можно характеризовать также пороговой энергией, выделенной в приборе [8].

Пороговая энергия повреждения – энергия при выделении которой в приборе за время действия импульса перенапряжения хотя бы один из параметров прибора выходит за нормы, установленные НТД. Для импульсных напряжений с длительностью импульса $\tau_n \leq 0,1$ мкс эта энергия постоянна и ее называют **критической энергией повреждения** [8].

Решение задачи. Большинство используемых на настоящее время методик оценок критериев работоспособности полупроводниковых приборов в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения [4,7] определяет критическую энергию $W_{кр}$, вызывающую отказ изделия следующим соотношением:

$$W_{кр} = U_d I_d \Delta t_{\min}, \quad (1)$$

где $U_d I_d$ – соответственно напряжение и ток лавинного пробоя, Δt_{\min} – минимальное время рассеивания наведенной ЭМИ мощности (развития пробоя).

Критическая энергия импульса, вызывающая отказ ППП не зависит от временных параметров воздействующего импульса перенапряжения, а определяется физико-конструктивными параметрами р-п-переходов и удельными сопротивлениями их высокоомных областей [8].

Универсальность пороговой энергии повреждения ППП, как параметра, характеризующего уровень их электромагнитной стойкости, заключается в том, что эти интегральные характеристики содержат как амплитудные, так и временные параметры воздействующих напряжений, и жестко не приведены к определенному виду источника их возникновения (грозовые разряды, разряды статического электричества,

высоковольтные ЛЭП и т.п.).

В связи с большим многообразием механизмов отказов полупроводниковых приборов определение точного значения энергии (мощности) повреждения изделия в настоящее время еще представляет определенные трудности. Но существуют ряд методик приближенных оценок уровней мощности повреждения изделия. К ним относится работа [10], где экспериментально для диодов и транзисторов была получена зависимость удельной пробойной мощности тока, проходящего через р-п-переход, от длительности импульса

$$P_{кр}/S = f(\tau),$$

где $P_{кр}$ – мощность тока, проходящего через поперечное сечение (S) р-п-перехода, при которой происходит катастрофический отказ диода (транзистора); τ – длительность прямоугольного импульса. Соответствующая зависимость широко используется в литературе по данной проблеме, носит название зависимости (кривой) Вунша – Белла и представлена на рис. 1. На рис. 1 в логарифмическом масштабе приведены теоретические и экспериментальные зависимости удельной пробойной мощности от длительности приложенного прямоугольного импульса [10].

Для аналитического описания экспериментальных данных авторами была получена полуэмпирическая формула зависимости удельной пороговой мощности (P/S , кВт/см²) отказов р-п-переходов от длительности импульса (t , мкс):

$$P/S = K_d \cdot t^{-1/2}, \quad (2)$$

где K_d – коэффициент деградации, который определялся на основании экспериментальных данных.

В работе [10] приводятся экспериментальные и теоретические (рассчитанные на основании полуэмпирических формул) результаты исследований стойкости диодов при подаче на них напряжений, отличных по форме от прямоугольных импульсов. Приведенные экспериментальные данные в целом удовлетворяли критерию Вунша-Белла.

Механизм обратимых отказов. Рассмотрим взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в слоистых полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике [11 – 12].

Определим спектр и затухание (нарастание) электромагнитных колебаний такой системы. Выбираем систему отсчета таким образом, чтобы оси X , Y были направлены параллельно, а ось Z – перпендикулярно границе раздела. Заметим, что потери энергии заряженной частицы при прохождении через слоистый диэлектрик впервые рассматривались в работе [3].

Пусть моноэнергетический нейтральный поток заряженных частиц с плотностью n_0 проходит с постоянной скоростью v_0 через периодическую структуру (период q), состоящую из чередующихся плазменных слоев d_1 , d_2 и различающихся диэлектрическими постоянными концентрациями электронов проводимости N_{01} , N_{02} .

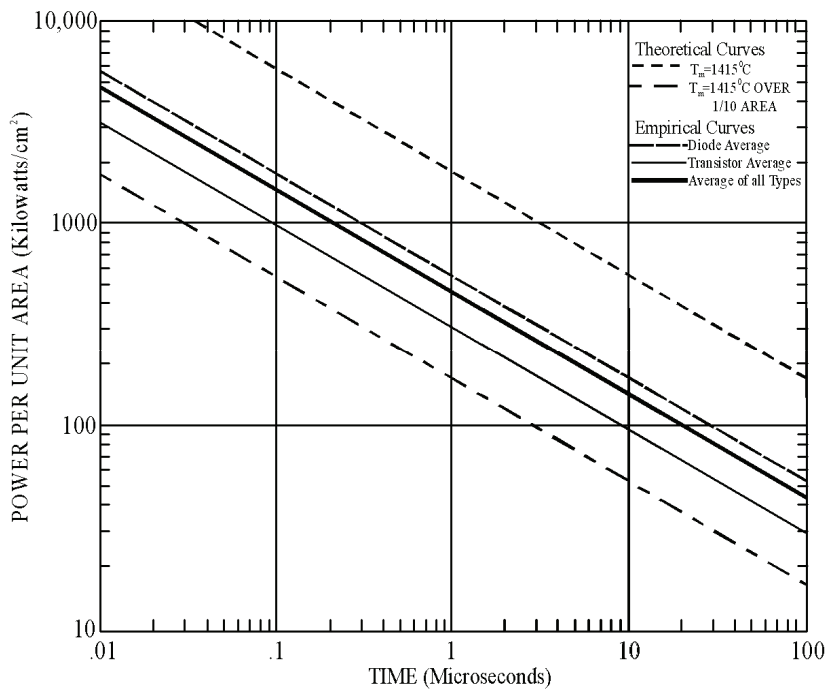


Рисунок 1 – Зависимость удельной пороговой мощности от длительности импульса (зависимость Вунша-Белла) [31]

На границе слоев выполняются условия непрерывности потенциалов и полных токов

Для описания электромагнитных свойств структуры состоящей из плазменных слоев, в пренебрежении эффектами запаздывания, воспользуемся системой уравнений Максвелла и гидродинамики. Представляя зависимость всех переменных величин от координат и времени экспоненциальной, легко получить решение уравнений в каждом слое. С помощью граничных условий можно исключить неопределенные константы и получить дисперсионное уравнение, связывающее между собой частоту, волновые векторы – ω , q_x , y , k и параметры среды.

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = \cos\lambda_1 d_1 \cos\lambda_2 d_2 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{2\lambda_1\lambda_2} \times \sin\lambda_1 d_1 \sin\lambda_2 d_2. \quad (3)$$

Это уравнение впервые было получено в работе [4], где была показана возможность возникновения неустойчивых состояний. При этом не принимались во внимание связанные с частотной дисперсией диэлектрической проницаемости собственные колебания, существующие в структуре в отсутствие пучка.

В случае малой плотности пучка $\lambda_1 d_1 \ll 1$; $\lambda_2 d_2 \ll 1$ уравнение (3) преобразуется к виду:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = 1 - \frac{\omega_0^2 d^2}{2v_0^2 \epsilon_{zz}}, \quad (4)$$

где

$\epsilon_{zz}(\omega) = d\epsilon_1\epsilon_2 / (d_1\epsilon_2 + d_2\epsilon_1)$ – компонента тензора диэлектрической проницаемости мелкодисперсной среды.

В случае слабой пространственной дисперсии:

$$\frac{\omega d}{v_0} \ll 1; \quad kd \ll 1$$

получим:

$$\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)^2 = \frac{\omega_0^2}{v_0^2 \epsilon_{zz}}. \quad (5)$$

Закон дисперсии колебаний имеет тот же вид, что и в однородной среде, диэлектрическая проницаемость которой равна $\epsilon_{zz}(\omega, d_1, d_2)$. В приближении малой плотности пучка получим:

$$\Delta\omega^2 = \frac{\omega_0^2}{\epsilon_{zz}(\omega = kv_0)}; \quad \Delta\omega \ll kv_0. \quad (6)$$

В этом случае возникают колебания с частотой, определяемой временем пролета τ частиц пространственного периода структуры $\tau = d/v_0$. Целое число l равно отношению времени пролета к периоду колебаний

Инкремент неустойчивости равен:

$$\text{Im } \Delta\omega = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\omega_0^2 \omega_{p1} d_1}{2\epsilon_{01} d} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где

$$\omega_{p1} = \frac{\omega_{01}}{\sqrt{\epsilon_{01}}}. \quad (7)$$

Если $\omega = kv_0$ то мы имеем неустойчивость в условиях черенковского резонанса с инкрементом, который в $(d_1/d_2)^{\frac{1}{3}}$ раз меньше чем в однородной плазме.

В случае $\omega_p = \frac{2\pi v_0}{d} l$ неустойчивость связана с черенковским параметрическим излучением заряженной частицы.

Таким образом зная величину инкремента неустойчивости мы можем оценивать такую характеристику обратимых отказов как величину энергии излучения собственных колебаний слоистой структуры в зависимости от параметров наведенного внешним

ЗМИ тока (концентрации носителей, их дрейфовой скорости и размеров структуры).

Выводы. 1. Приведены предельно допустимые эксплуатационные параметры отечественных полупроводниковых приборов, определяющих электромагнитную стойкость. Там же сформулированы практические рекомендации по обеспечению и повышению электромагнитной стойкости полупроводниковых приборов элементной базы ТС:

– энергия повреждения ППП лежит в пределах от 10^{-4} до 10^{-7} Дж;

– менее стойкими оказываются высокочастотные импульсные и маломощные ППП;

– тепловой пробой ППП как правило возникает при запираии транзисторов, работающих в ключевом режиме при больших напряжениях и токах, не превышающих предельных значений для этих приборов;

– явление смыкания (прокола) базы чаще всего возникает у транзисторов, получаемых методом сплавления, у транзисторов с неоднородной базой это явления практически отсутствует;

– основной причиной отклонения параметров логических микросхем от норм ТУ является нарушение функций их диодов и транзисторов

2. Предложена модель возникновения обратимых отказов полупроводниковых приборов, обусловленных взаимодействием наведенных внешним ЭМИ токов с электростатическими колебаниями полупроводниковой сверхрешетки. Модель базируется на реализации резонансного (черенковского) взаимодействия движущихся зарядов и электромагнитных колебаний в условиях, когда совпадают фазовая скорость волны и скорость заряженной частицы.

Получены расчетные соотношения, связывающие величину инкремента неустойчивостей с величиной наведенных токов и параметрами слоистых структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, размерами структуры.

Приведенные количественные оценки инкремента неустойчивостей показывают, что величина энергии излучения лежит в пределах чувствительности современных приемников излучения субмиллиметрового диапазона

Список литературы: 1. *Мырова Л.О.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / *Л.О.Мырова, А.З.Чепиженко.* – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И.* Электромагнитные влияния на сооружения связи / *М.И.Михайлов, Л.Д.Разумов, С.А.Соколов.* – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела / *М.Стил, Б.Вюраль.* – М.: Атомиздат – 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н.* Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / *Н.Н.Белецкий, В.М.Светличный, Д.Д.Халамейда, В.М.Яковенко.* – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов / *С.Зи.* – М.: Мир, 1984.

– 456 с. 6. *Кравченко В.И.* Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий / *В.И.Кравченко, В.И. Яковенко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62–69. 7. *Кравченко В.И.* Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161. 8. *Кравченко В.И.* Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169. 9. *Кравченко В.И.* Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89. 9. *Кравченко В.И.* Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С.89–96. 10. *Кравченко В.И.* Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103. 11. *Кравченко В.И.* Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С.103–111.

Bibliography (transliterated): 1. *Myrova L.O., Chepizhenko A.Z.* Obespechenie stoykosti apparatury svyazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235. Print. 2. *Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A.* Jelektromagnitnye vlijanja na sooruzhenija svyazi. Moscow: Radio i svjaz', 1979. 225. Print. 3. *Stil M., Vjural' B.* Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312. Print. 4. *Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M.* Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. – Kyviv: Naukova dumka, 1991. 216. Print. 5. *Zi S.* Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir, 1984. 456. Print. 6. *Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. 62–69. Print. 7. *Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Losev F.V.* Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 154–161. Print. 8. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jelektromagnitnogo vozdejstvia. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 161–169. Print. 9. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 83–89. Print. 9. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 89–96. Print. 10. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvia storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 96–103. Print. 11. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvia poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvia storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 103–111. Print.

Поступила (received) 06.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ ХПИ, тел. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, professor, director of NIPKI «Molnija» NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 33, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department Information System of NTU "KhPI". tel. (057) 707 66 18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, docent, professor of the Department Information System of NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of Department Information System NTU "KhPI". Tel. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, А.А СЕРКОВ, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, И.В ЯКОВЕНКО

ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ НА СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ И ПЛАЗМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Определен механизм возникновения поверхностных электронных состояний на периодически неровной границе проводящих твердых тел. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, бесстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Исследованиям поверхностных электронных состояний посвящено большое количество работ, в которых основное внимание уделялось исследованию электронных состояний, возникающих на поверхности кристалла и обусловленных ограниченностью кристаллической решетки или, другими словами, обрывом периодического потенциала [1]. При этом, в зависимости от выбора физической модели различают состояния Тамма, возникающие вследствие изменения хода потенциала на границе кристалл – вакуум, и состояние Шокли, обусловленное обрывом связей атомов на границе.

Однако упомянутые выше две модели не исчерпывают всех задач о поверхностных состояниях. Вызывает интерес иная ситуация, когда частица движется в поле постоянного, а не периодического потенциала, но ее движение ограничено в одном направлении неровной стенкой, представляющей собой бесконечно высокий потенциальный барьер.

Известно, что если граница гладкая, то поверхностные состояния не возникают. В случае же неровной поверхности раздела сред вопрос о квантовых поверхностных состояниях изучен недостаточно полно. В настоящей работе исследовались возможности появления поверхностных электронных состояний, обусловленных наличием малых периодических неровностей границы твердого тела [7–9].

Постановка и решение проблемы. Рассмотрим электронные состояния в полупространстве $y > y_0(x)$, ограниченном потенциальным барьером $U(x,y)$ [7]

$$\begin{aligned} U(x,y) &= \infty & y \leq y_0(x); \\ U(x,y) &= 0 & y > y_0(x). \end{aligned} \quad (1)$$

где $y_0(x)$ – функция, описывающая форму границы раздела сред. В данном параграфе ограничимся рассмотрением границы – бесконечно высокого потенциального барьера, неровности которой зависят от одной координаты x . Собственные волновые функции $\Psi(x,y,z)$ и собственные значения энергии электрона E определяются решением уравнения Шредингера:

$$\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar^2}[E - U(x,y)]\Psi = 0. \quad (2)$$

и граничными условиями на поверхности $y = y_0(x)$ и бесконечности. На поверхности $y = y_0(x)$ граничные условия бывают двух типов [8]:

$$\Psi(y_0(x)) = 0. \quad (3)$$

$$\vec{n}\vec{\nabla}\Psi|_{y=y_0(x)} = 0; \quad \vec{\nabla} = \vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial}{\partial z}, \quad (4)$$

где \vec{n} – вектор нормали к поверхности $y = y_0(x)$:

$$n_x = -\frac{\frac{\partial y_0}{\partial x}}{\sqrt{\left(\frac{\partial y_0}{\partial x}\right)^2 + 1}}; \quad n_y = -\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial y_0}{\partial x}\right)^2 + 1}}; \quad n_z = 0. \quad (5)$$

Условия (3)–(4) означают, соответственно, равенство нулю плотности потока частиц и плотности частиц.

В случае периодически неровной границы

$$y_0(x) = \zeta_0 \cos(Gx); \quad d = \frac{2\pi}{G} -$$

волновая функция $\Psi(x, y, z)$ может быть представлена следующим образом:

$$\Psi(x, y, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp[i(k_x + nG)x + ik_y y + ik_z z]. \quad (6)$$

где $\vec{k}(k_x, k_y, k_z)$ – волновой вектор электрона. Из уравнения Шредингера (2) следует соотношение между E и \vec{k} :

$$k_{yn}^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} - (k_x + Gn)^2 - k_z^2. \quad (7)$$

а граничное условие (4) задает связь между величинами k_x , k_{yn} и k_z , определяя тем самым закон дисперсии $E = E(\vec{k})$.

Для решения уравнения Шредингера с условием (4) воспользуемся теорией возмущения, считая, что амплитуда неровностей мала по сравнению с ее периодом ($\zeta_0 k_x \ll 1$). Это позволяет ограничиться рассмотрением гармоник $n = -1, 0, 1$ из которых амплитуда гармоники A_0 является максимальной.

Подставляя в уравнение (4) выражение (6) получим следующее дисперсионное соотношение:

$$k_{y0} = -\frac{1}{4} \zeta_0^2 \left(\frac{[k_{y-1}^2 - G(k_x - G)] [k_{y0}^2 + Gk_x]}{k_{y-1}} + \frac{[k_{y1}^2 + G(k_x + q)] [k_{y0}^2 - Gk_x]}{k_{y1}} \right). \quad (8)$$

Решение (8) определяется путем последовательных приближений по малому параметру

$$\zeta_0: \quad k_{y0} = k_{y0}^{(0)} + \delta k_{y0} + \dots$$

Если $\zeta_0 = 0$, то $k_{y0}^{(0)} = 0$ и

$$k_x^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} - k_z^2. \quad (9)$$

Следующее приближение дает:

$$\delta k_{y0} = -\frac{1}{4} (\zeta_0 k_x G)^2 \left(\frac{1}{k_{y1}} + \frac{1}{k_{y-1}} \right). \quad (10)$$

$$\delta E = \frac{\hbar^2 \delta k_{y0}^2}{2m}; \quad k_{y\pm 1}^2 = -G(G \pm 2k_x). \quad (11)$$

В случае, когда $k_x \ll q$ из уравнения (10) получим:

$$\delta k_{y0} = \frac{1}{2} i (\zeta_0 k_x)^2 G; \quad k_{y1} = k_{y-1} = iG. \quad (12)$$

Из уравнения (12) видно, что длина пространственной локализации волновой функции электрона

$R = \frac{i}{\delta k_{y0}}$ уменьшается с увеличением волнового вектора k_x .

Наиболее эффективно периодические неоднородности поверхности влияют на электронные состояния в условиях резонанса, когда совпадают волновые векторы соседних гармоник, распространяющихся в противоположных направлениях оси x , (например, $k_{y0} = k_{y-1}$). В этом случае $k_x = \frac{1}{2} G \equiv k_r$ и из уравнения (10) получим:

$$\delta k_{y0}^2 = -\zeta_0^2 k_r^2; \quad (14)$$

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} [k_z^2 + k_r^2 (1 - \zeta_0^2 k_r^2)]. \quad (15)$$

Уравнение (14) имеет следующие решения:

$$\text{Re } \delta k_{y0} = 0; \quad \text{Im } \delta k_{y0} = \zeta_0 k_r^2. \quad (16)$$

которые соответствуют предельно локализованному поверхностному состоянию. Таким образом, электронные поверхностные состояния существуют в области $k_x \leq \frac{G}{2} - (\text{Im } k_{y0\pm 1} > 0)$.

В области $k_x > G/2$ часто поверхностные состояния не возникают. При этом δk_{y0} и E принимают комплексные значения. В области $k_x \gg G$ уравнение (8) имеет решение:

$$\delta k_{y0} = \frac{(-1+i)\zeta_0^2 (k_x G)^{3/2}}{\sqrt{2}}. \quad (17)$$

$$\delta E = -i \frac{\hbar^2 \zeta_0^4 (k_x G)^3}{2m}. \quad (18)$$

Это означает, что квантовые состояния являются квазистационарными, то есть $\Psi \sim e^{-t/\tau}$ со временем жизни

$$\tau = \frac{2m}{\hbar^2 \zeta_0^4 (k_x G)^3}. \quad (19)$$

Выводы

1. Полученные выше результаты указывают на то, что неровности границы раздела двух сред приводят к возникновению поверхностных электронных состояний, волновая функция которых экспоненциально убывает с расстоянием при удалении от границы.

2. Экспериментальное наблюдение указанных эффектов может быть осуществлено, например, на границе полупроводник-диэлектрик. Граница может иметь естественную шероховатость или периодическую структуру в виде дислокаций несоответствия, или же можно создать искусственный периодический рельеф. Согласно полученным результатам, электроны будут локализоваться вблизи границы в слое толщиной R , поскольку $\Psi \sim e^{-y/R}$. Если взять период поверхности $a = 10^{-5}$ см, величине, доступной при литографическом способе изготовления структуры, а соотношение между амплитудой неровностей ζ_0 и длиной волны ($\lambda = 1/k$) $\zeta_0 k \approx 0.1$, то электроны будут локализоваться в слое толщиной $R \approx 10^{-4}$ см в резонансном случае, а в длинноволновом пределе в слое, толщиной на порядок больше.

3. Следует отметить, что в предельных случаях – длинноволновом и коротковолновом – R имеет одинаковые порядки величин как для периодической поверхности, так и для случайной. В этих предельных случаях свойства поверхности слабо проявляются на длине волны. Наиболее эффективное взаимодействие возникает, когда длина волны де Бройля электрона сравнима с характерным размером неоднородности и выполняется условие отражения Брэгга.

4. Определен спектр собственных электромагнитных колебаний неоднородного плазменного слоя, возникающего на границе проводящих твердых тел, малые неровности которых имеют периодический (статистический) характер. Показано, что наличие поверхностных электронных состояний приводит к появлению поверхностных поляритонов, закон дисперсии которых отличается от закона дисперсии поляритонов, распространяющихся вдоль гладкой поверхности плазмы. Неоднородность плазмы вблизи поверхности приводит к появлению пространственной дисперсии поверхностных электростатических колебаний, их фазовая скорость меньше фазовой скорости поляритонов, распространяющихся вдоль гладкой поверхности полупроводниковой плазмы.

Список литературы: 1. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О.Мырова, А.З.Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И.Михайлов, Л.Д.Разумов, С.А.Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. Стил М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М.Стил, Б.Вюраль. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н.Белецкий, В.М.Светличный, Д.Д.Халамеда, В.М.Яковенко. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С.Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с. 6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62–69. 7. Кравченко В.И. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161. 8. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169. 9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89. 10. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96. 11. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103. 12. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 103–111.

Bibliography (transliterated): 1. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235. Print. 2. Михайлов М.И., Разумов Л.Д. and Sokolov S.A. Jelektromagnitnye vlijaniya na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz', 1979. 225. Print. 3. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312. Print. 4. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyx strukturah. Kyiv: Naukova dumka, 1991. 216. Print. 5. Zi C. Fizika poluprovodnikovyx priborov. Moscow: Mir, 1984. 456. Print. 6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izlucheniya na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. 62–69. Print. 7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 154–161. Print. 8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jelektromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 161–169. Print. 9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyx komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 161–169. Print. 10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyx stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izlucheniya. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 89–96. Print. 11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyx struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izlucheniya. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 103–111. Print.

Поступила (received) 07.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, professor, director of NIPKI "Molniya" NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidat of Technical Sciences, docent, professor of the Department Information System of NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of Information NTU "KhPI". Tel. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, А.А СЕРКОВ, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, И.В ЯКОВЕНКО**ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Предложены физические модели появления обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия электромагнитного излучения. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, бесстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Расширение областей применения и возрастание быстродействия радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) приводит к необходимости все большего использования элементной базы, содержащей изделия полупроводниковой электроники [1]. Это увеличивает степень влияния внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) на работоспособность РЭА, к воздействию которого полупроводниковые комплектующие обладают повышенной чувствительностью.

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. Моделирование механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например, оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), однако вопросы, связанные с определением различного рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделиях при воздействии ЭМИ остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

Постановка и решение проблемы.

К настоящему времени область необратимых отказов полупроводниковых комплектующих технических средств (ТС) исследована довольно детально как экспериментально так и теоретически [1]. Большинство используемых на настоящее время методик оценки критериев стойкости полупроводниковых приборов в этой области отказов в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения (ЭМИ) [2–3] использует в этом качестве величину критической энергии $W_{кр}$, превышение которой приводит к

полной утрате работоспособности.

Для расчетов токов и напряжений, наведенных ЭМИ, определяющих $W_{кр}$ и возникающих непосредственно в полупроводниковых комплектующих внутри ТС обычно используют модель линий передачи (обобщенные телеграфные уравнения). При этом комплектующие электрорадиоизделия (ЭРИ) рассматриваются как линейные схемы, содержащие R, L, C – элементы и включают независимые источники токов и напряжений, обусловленные внешним электромагнитным воздействием. Уравнения схемы решаются в частотной области, для перехода во временную область используется обратное преобразование Фурье [1].

Данный подход позволяет достоверно оценивать критерии электромагнитной стойкости в области необратимых отказов [2], но обладает рядом существенных ограничений и не учитывает ряд эффектов, способных повлиять на работоспособность полупроводниковых приборов в области обратимых отказов.

Эти ограничения связаны с тем, что при анализе обратимых (кратковременных) нарушений работоспособности полупроводниковых приборов необходимо учитывать следующие факторы стороннего электромагнитного воздействия [8] :

- длительность фронта и спада импульса ЭМИ;
- геометрические размеры полупроводниковых комплектующих ЭРИ
- взаимную ориентацию комплектующих ППП и векторов полей ЭМИ;
- конструктивным расположением монтажа схем относительно корпуса аппаратуры.

При определении критериев электромагнитной стойкости полупроводниковых приборов, данные факторы не могут быть учтены в полной мере в рамках теории линии передачи.

В частности, [1] теория длинных линий ограничена диапазоном низких частот, то есть размеры системы меньше длин волн, что делает невозможным описание механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов с физическими процессами, протекающими непосредственно в полупроводниковых комплектующих и определяющих их работоспособность в условиях, когда размеры структур сравнимы с длинами

волн.

Кроме того, в рамках теории линии передачи обычно предполагается, что нагрузка согласована с линией, а вся подведенная энергия ЭМИ выделяется в критическом элементе схемы. Однако нагрузка согласована не во всем диапазоне частот и маломощный критический элемент стоит не непосредственно на входе, а после нескольких пассивных элементов, способных принять на себя часть энергии ЭМИ. Поэтому, для определения критериев возникновения обратимых отказов (временной утраты работоспособности) в рамках линии передачи необходимо рассчитывать переходной процесс для каждой конкретной схемы ЭРИ.

Наконец, используемый подход (одномерное приближение) не учитывает эффекты связанные с пространственной ограниченностью полупроводниковых изделий и их расположением к направлению воздействующего ЭМИ (конфигурацией электромагнитного поля и направлением векторов рабочих токов и напряженностей в самих комплектующих ТС).

Для описания физических механизмов возникновения обратимых отказов полупроводниковых комплектующих ЭРИ предлагается более строгая методика, основанная на использовании полной системы уравнений электродинамики (Максвелла), дополненных материальными уравнениями для сред, комплектующих полупроводниковые приборы, и граничными условиями, позволяющими определять взаимосвязь между величинами наведенных ЭМИ токов с собственными электромагнитными полями полупроводниковых приборов. Данный подход дает возможность исследовать процессы взаимодействия электромагнитных колебаний и наведенных ЭМИ токов непосредственно в полупроводниковых комплектующих ЭРИ, описать которые в рамках теории линий передач не представляется возможным.

Таким образом, в качестве объекта исследований в настоящей работе рассматривались не схемы с сосредоточенными параметрами, а ограниченные проводящие (полупроводящие) среды из которых и состоят комплектующие электрорадиоизделий.

Результаты данной работы в определенной степени компенсируют существующие пробелы в исследованиях одного из видов обратимых отказов – искажения вольт – амперных характеристик полупроводниковых приборов в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения.

Причиной возникновения подобных искажений рабочих характеристик приборов является, на наш взгляд, возможность трансформации энергии наведенных внешним ЭМИ токов в энергию собственных электромагнитных колебаний комплектующих ЭРИ.

В качестве канала передачи энергии наведенных внешним излучением токов полупроводниковым комплектующим рассматривались поверхностные волны, существующие на границах проводящих твердых тел.

Выбор поверхностных колебаний в качестве канала передачи энергии внешнего излучения не случаен – этот тип волн локализован вблизи границ раздела сред, комплектующих полупроводниковые приборы,

поэтому они более эффективно, чем объемные колебания, переносят энергию внешних электромагнитных полей [9].

В настоящей работе исследовались два возможных механизма преобразования энергии движущихся зарядов (наведенных ЭМИ токов) в энергию поверхностных плазмонов полупроводниковых комплектующих ТС – эффекты переходного и черенковского излучения (соответствующая взаимная конфигурация векторов напряженностей воздействующего электрического поля и прямого тока полупроводникового прибора показаны на рис. 1)

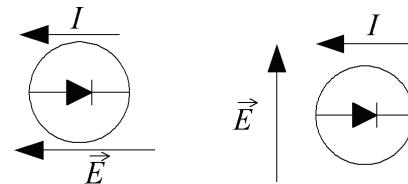


Рисунок 1 – Взаимное расположение напряженности воздействующего электрического поля \vec{E} и прямого тока \vec{I} полупроводникового прибора (диода)

Механизм реализуется, когда наведенный ток (направление вектора напряженности электрического поля воздействующего внешнего ЭМИ) перпендикулярен границам раздела сред твердотельной структуры (полупроводникового прибора) (рис 1, б) и состоит в следующем [10].

При движении заряда в материальной среде, создаваемое им электромагнитное поле определяется не только величиной заряда и его скорости, но и диэлектрическими свойствами среды. Если эти свойства меняются, когда заряд с постоянной скоростью пересекает границу раздела сред (полупроводниковой структуры), то создаваемое зарядом поле меняется, часть поля отрывается от частицы и может излучаться в пространство. Возникающее при этом излучение получило название переходного. В результате, при прохождении потока частиц, наведенных ЭМИ, через полупроводниковую структуру происходит непрерывный процесс преобразования энергии зарядов в энергию собственных колебаний поля. то есть в структуре устанавливается режим генерации колебаний.

Следует отметить, что последние экспериментальные исследования переходного излучения служат основой разработок новых методов диагностики потоков заряженных частиц, обладающих высокой энергией и, кроме того, при решении задач генерации и усиления электромагнитных колебаний [9]. Эффект переходного излучения определяет механизмы возбуждения самых различных мод полупроводниковых структур, поэтому появляется возможность переносить энергию поверхностных колебаний через границу полупроводниковых приборов через границу, для которой она, в отсутствие наведенных токов (то есть воздействия стороннего ЭМИ), является непрозрачной.

Второй механизм трансформации энергии движущихся зарядов в энергию колебаний рассмотренный в работе – эффект излучения Вавилова – Черенкова (черенковское излучение) [5].

Он реализуется, когда наведенные токи движутся вдоль границы полупроводниковой структуры, а фазовая скорость поверхностной волны равна скорости заряженных частиц (рис 2, а). В условиях такого резонанса энергия наведенных токов (потока заряженных частиц) трансформируется в энергию собственных колебаний комплектующих ЭРИ и в полупроводниковом приборе также устанавливается режим генерации колебаний.

Режим генерации колебаний в полупроводниковых приборах обычно проявляет себя на участке его вольт – амперной характеристики (ВАХ), обладающей отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) ($R = \Delta U / \Delta I < 0$). В этом случае наведенный ток (электронный поток наведенный ЭМИ в полупроводниковом приборе) теряет часть своей энергии ($W_{эл} < 0$); при этом рост тока ΔI сопровождается падением напряжения ΔU . Появление такого рода отклонений вольт – амперных характеристик характеризует один из возможных механизмов обратимых отказов.

Поэтому, в качестве энергетического критерия оценки электромагнитной стойкости полупроводниковых приборов в этой области обратимых отказов рассматривалась величина энергии излучения собственных поверхностных колебаний полупроводниковых приборов, обусловленная их взаимодействием с наведенными внешним ЭМИ токами $W_{изл} = W_{эл}$

$$W_{изл} = I_n U_n \Delta t_{\text{вз}} \quad (1)$$

Таким образом величина $W_{изл}$ определяющая степень отклонения ВАХ, является количественной характеристикой данного типа обратимых отказов, где I_n , U_n – соответственно наведенные ток и напряжение, $\Delta t_{\text{вз}}$ – время эффективного действия.

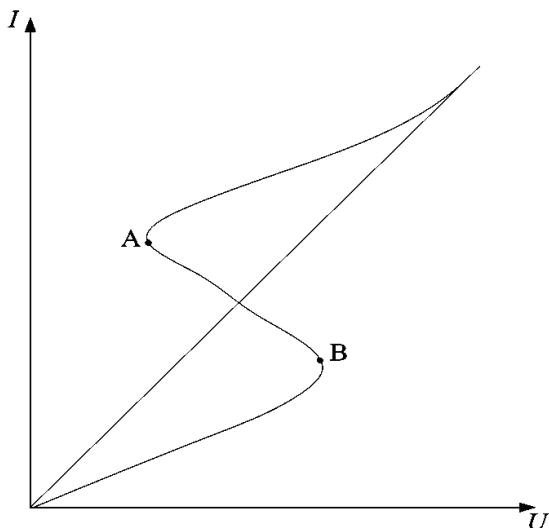


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики полупроводникового диода: ВАХ в отсутствие внешнего ЭМИ; ВАХ при наличии внешнего ЭМИ (обратимый отказ) (участок АВ)

Данный механизм обратимых отказов (появление S-образной вольт – амперной характеристики прямого тока прибора – рис. 2) реализуется в условиях, когда напряженности амплитуд напряженностей электрического E и магнитного H полей, действующего на

полупроводниковую структуру излучения, лежат в диапазоне $E < 100$ кВ/м; $H < 600$ А/м [2].

В случае, когда амплитуды напряженностей воздействующих полей напряженности превышают указанные пределы наблюдается развитие необратимых отказов прибора (тепловой пробой с последующим плавлением и выгоранием металлизации и контактных дорожек [9].

Авторами [7–11] был решен ряд задач взаимодействия волн и наведенных ЭМИ токов в полупроводниковых структурах, позволяющий количественно оценить наведенные токи и напряжения, а также время эффективного взаимодействия наведенных токов с собственными полями полупроводниковых структур.

Эти величины, характеризующие энергию излучения $W_{изл}$, (степень отклонения ВАХ от нормы) определялись в рамках теории пучковых неустойчивостей, поскольку режим генерации колебаний характеризуется экспоненциальным ростом амплитуды E электромагнитных полей излучения полупроводниковых приборов:

$$E \approx \exp(+\gamma t); \quad \gamma = \frac{1}{\Delta t_{\text{вз}}}$$

Здесь γ – инкремент неустойчивости, его величина определяется параметрами наведенных токов и полупроводникового прибора (концентрацией носителей тока и их скоростью).

Таким образом, решение задач возникновения и развития пучковых неустойчивостей в полупроводниковых структурах (определение инкремента неустойчивостей γ) позволяет построить физическую модель возникновения одного из типов обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения.

Используя данную модель в [6–11] были получены количественные характеристики электромагнитной стойкости ТС (величина энергии излучения $W_{изл}$) в области обратимых отказов.

Выводы

1. Приведены результаты исследований, характеризующие нарушения функционирования электрорадиоизделий (ЭРИ) в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения, а также основные параметры, характеризующие электромагнитную стойкость ЭРИ к воздействию импульсных токов и напряжений.

2. Приведены основные электромагнитные эффекты, влияющие на работоспособность ЭРИ в условиях внешнего воздействия, а также указаны характерные изменения параметров ЭРИ, определяющих их функциональное назначение, которые являются следствием возникновения данных эффектов.

3. Приведены основные типы нарушений ЭРИ в условиях воздействия электромагнитного излучения (обратимые и необратимые отказы).

4. Приведены характерные типы нарушений функционирования полупроводниковых приборов (ППП), комплектующих ЭРИ, в областях необратимых и обратимых отказов, а также уровни напряженностей действующих на ППП электрических и

магнитных полей ($E < 100$ кВ/м; $H < 600$ А/м), разделяющих области обратимых и необратимых отказов.

5. На основе энергетического подхода обоснована физическая модель возникновения одного из видов обратимых отказов полупроводниковой элементной базы ТС (появление S-образных участков вольт-амперных характеристик). В основе появления этого типа обратимых отказов лежит процесс преобразования энергии наведенных ЭМИ токов в энергию собственных колебаний полупроводниковой структуры (установление режима генерации собственных колебаний). Данная физическая модель позволяет определять критерии электромагнитной стойкости ряда полупроводниковых приборов к воздействию внешнего импульсного излучения, а также получать расчетные соотношения для оценок степени отклонения рабочих характеристик ППП от нормы.

Список литературы: 1. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И.Михайлов, Л.Д.Разумов, С.А.Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 2. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О.Мырова, А.З.Чепижченко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 3. Стил М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М.Стил, Б.Вюраль. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н.Белецкий, В.М.Светличный, Д.Д.Халамейда, В.М.Яковенко. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С.Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с. 6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплексуемых электрорадиоизделий / В.И.Кравченко, В.И.Яковенко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62–69. 7. Кравченко В.И. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161. 8. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169. 9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешнего электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплексуемых электрорадиоизделий / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89. 9. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения

на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96. 10. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103. 11. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С.103–111.

Bibliography (transliterated): 1. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235. Print. 2. Mihajlov M.I., Razumov L.D. and Sokolov S.A. Jelektromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svyazi. Moscow: Radio i svjaz', 1979. 225. Print. 3. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312. Print. 4. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kyjiv: Naukova dumka, 1991. 216. Print. 5. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir, 1984. 456. Print. 6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. 62–69. Print. 7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vnesnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 154–161. Print. 8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jelektromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 161–169. Print. 9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vnesnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 83–89. Print. 9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 89–96. Print. 10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 96–103. Print. 11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh stuktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 103–111. Print.

Поступила (received) 14.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, professor, director of NIPKI "Molnija" NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: :saa@kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidat of Technical Sciences, docent, professor of the Department Information System of NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of Information NTU "KhPI". Tel. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, А.А СЕРКОВ, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, И.В ЯКОВЕНКО**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Исследованы существующие физические механизмы влияния внешних электромагнитных полей на работоспособность полупроводниковых приборов в области необратимых отказов. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, безтолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. Целью настоящей работы является анализ существующих результатов экспериментальных исследований влияния импульсного электромагнитного излучения на работоспособность полупроводниковых приборов в области необратимых отказов. для обоснования физических моделей их возникновения и получения на их основе расчетных соотношений, определяющих критерии возникновения и количественные характеристики данного типа отказов.

Цель работы. Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований необратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

Постановка и решение задачи. Как известно, основным критерием работоспособности полупроводниковых приборов в области необратимых отказов является критическая (пороговая) энергия, выделяемая в приборе в результате действия ЭМИ. Превышение ее величины приводит к необратимым процессам (обычно перегреву носителей тока (электронов) и, как следствие, – тепловому пробоя).

Рассмотрим два наиболее вероятных механизма влияния наведенных внешним ЭМИ токов и напряжений на работоспособность полупроводниковых приборов, которые позволяют обосновать физические модели возникновения необратимых отказов и определять новые критерии оценки их работоспособности. Первый связан с разогревом носителей под действием стороннего электромагнитного поля, второй – с появлением дополнительных потоков частиц в полупроводниках [1-4].

Известно, что первый из указанных механизмов необратимых отказов связывают с эффектом вторичного теплового пробоя, появление которого является

результатом локального перегрева в области р-п переходов. Возможность преобразования энергии токов, наведенных ЭМИ в тепловую энергию, обусловлено очень маленькими размерами р-п областей. Поскольку энергия рассеиваемая в окрестностях активных областей р-п переходов, тепло выделяется на малой площади и температура может достигать величин порядка длительности плавления материалов для напряженностей полей $E > 100$ кВ/м и длительности импульса несколько сотен наносекунд. Это приводит к вторичному тепловому пробоя, который сопровождается плавлением пленок, созданных металлизацией, образованием дуги между металлизированными участками.

В настоящее время обычно используется приближенная оценка мощности повреждения полупроводникового прибора (критерий необратимого отказа) основанная на численном решении уравнения теплопроводности. Ее осуществляют с помощью полуэмпирической формулы для пороговых уровней мощности теплового повреждения полупроводника [5]:

$$P = K \cdot S \cdot \sqrt{C\lambda\gamma} \cdot (T_m - T_i) \cdot t_n^m, \quad (1)$$

где P – пороговый уровень мощности, приводящий к повреждению прибора; K – эмпирическая константа, зависящая от конструкции прибора; S – нагреваемая площадь; C – теплоемкость материала; λ – коэффициент теплопроводности; γ – плотность материала; T_m – предельная для прибора температура, превышение которой приводит к повреждению прибора; T_i – температура окружающей среды; T_n – длительность импульса напряжения, m – константа, определяемая длительностью импульса.

В области обратимых отказов формула (1) требует существенной корректировки, поскольку если ЭМИ не настолько мощный (энергия в полупроводнике не достигается), возникающий из-за разогрева электронный поток не вызывает теплового пробоя, но оказывает существенное влияние на основные параметры полупроводника (проводимость, концентрацию носителей). Это существенно сказывается на выходных характеристиках изделия.

В качестве критерия электромагнитной стойко-

сти необратимых отказов может выступать также условие появления тепловой неустойчивости [6]. Механизм ее развития обусловлен тем, что наведенный ЭМИ ток в р-п переходе при обратном смещении напряжения выделяет тепло. Увеличение обратного напряжения вызывает повышение температуры перехода. Что в свою очередь приводит к возрастанию обратного тока, таким образом, на вольт – амперной характеристике возникает участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Подобный эффект позволяет установить зависимость между наведенным ЭМИ током и искажением обратного напряжения.

Участок вольт-амперной характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением характеризуется величиной V_n – диапазон напряжений развития тепловой неустойчивости. При воздействии стороннего ЭМИ прибор не выходит из строя, но вид участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением характеризует величину амплитуды и длительность импульса воздействующего поля.

В табл. 1 приведен участок обратной ветви вольт – амперной характеристики диода Д 312 А – германиевый, мезадиффузионный, импульсный, диапазон амплитуды импульса напряжения $E \approx 160...200$ кВ/м [8]:

- на первой стадии наблюдаются нестабильность тока на напряжениях близких к уровню лавинного роста числа носителей,
- на второй стадии происходит переключение из области высокого в область низкого напряжения,
- на третьей стадии наблюдается резкий рост тока при малом росте напряжения,
- четвертая стадия соответствует выходу из строя прибора.

Следует отметить, что на настоящее время детально исследованы экспериментально только уровни напряжения соответствующие четвертой стадии (необратимые отказы). Однако влияние наведенных ЭМИ токов может сказываться на вольт амперных характеристиках данного типа приборов уже на первой стадии – лавинного роста носителей. Возникновение искажений вольт – амперной характеристики при этом связано с температурной нестабильностью. Когда на транзистор поступает достаточно мощный импульс напряжения, вызывающий вторичный пробой, последний наступает с некоторой задержкой во времени. Это время называют временем включения вторичного пробоя. Именно это время – $\tau_{пр}$ характеризует необратимые отказы (соответственно при $\tau < \tau_{пр}$ отказы носят обратимый характер).

Таблица 1 – Обратная ветвь вольт – амперной характеристики при тепловой неустойчивости (диод Д 312 А)

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Плотность обратного тока $I_R, \text{mA/cm}^2$	Обратное напряжение $V_R, \text{В}$
20	0,3	12,3
30	0,4	45,5
40	0,8	68,2
50	1,2	58,4
60	3,2	43,1
70	4,5	41,3

Таблица 2 – Зависимость времени включения вторичного пробоя структуры Si-Au-Ge от мощности приложенного импульса при различной температуре

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Время включения $\tau_{пр}, \text{с}$	Мощность импульса $P, \text{Вт}$
100	10^{-4}	6,1
	$5 \cdot 10^{-4}$	5,3
	$7 \cdot 10^{-4}$	3,2
50	10^{-4}	7,2
	$6 \cdot 10^{-4}$	5,5
	$8 \cdot 10^{-4}$	4,1
20	10^{-4}	8,3
	10^{-4}	7,1
	10^{-4}	5,2

В [9] в табл. 2 приведена зависимость времени включения $\tau_{пр}$ вторичного пробоя от мощности приложенного напряжения импульса при различной температуре окружающей среды T_0 . Для определенного времени включения $\tau_{пр}$ существует температура включения вторичного пробоя $T_{пр}$, под которой следует понимать температуру «горячих точек» в момент предшествующий вторичному пробую. Величина $T_{пр}$ связана с мощностью импульса P и температурой окружающей среды T_0 следующим соотношением.

$$T_0 - T_{пр} = C_1 P, \quad (2)$$

где C_1 – постоянная.

При фиксированной температуре соотношение между мощностью импульса и временем включения приблизительно равно

$$\tau_{пр} \approx \exp(-C_2 P), \quad (3)$$

где C_2 – постоянная.

Из выражений (2) и (3) следует равенство для времени включения вторичного пробоя

$$\tau \approx \exp\left(-\frac{C_2}{C_1}(T_0 - T_{пр})\right). \quad (4)$$

Температура вторичного пробоя $T_{пр}$ зависит от различных параметров и геометрии приборов. Для большинства кремниевых диодов и транзисторов температура $T_{пр}$ соответствует той температуре, при которой концентрация носителей собственного материала равна концентрации примеси в коллекторе. Горячие точки обычно располагаются вблизи центра прибора. Величина $T_{пр}$ изменяется в зависимости от концентрации примесей в коллекторе, а отношение постоянных C_1/C_2 определяется геометрией прибора. Поэтому время включения вторичного пробоя сильно колеблется в зависимости от типа и режима работы транзистора (диода).

За пределами области нестабильных токов напряжение на приборе резко падает и в течении второй стадии сопротивление горячих точек резко уменьшается. На третьей стадии (стадии низкого напряжения) полупроводник находится при высокой температуре а вблизи точек пробоя становится собственным полупроводником.

При дальнейшем возрастании тока точки пробоя начинают плавиться и наступает четвертая стадия – разрушение прибора. Время включения $\tau_{пр}$ характеризует именно эту область – область необратимых отказов. Для определения степени отклоне-

ния вольт – амперных характеристик с использованием данной методики на каждой из предыдущих стадий разряда необходимо оценивать все четыре составляющие $\tau_{пр}$ в зависимости от амплитуды и длительности воздействующего ЭМИ.

Выводы:

– проведен сравнительный анализ существующих экспериментальных и расчетных методик, определяющих критерии возникновения и количественные характеристики необратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения, определение областей параметров внешнего воздействия, где реализуется данный тип отказов;

– дано обоснование физических моделей возникновения необратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия импульсного электромагнитного поля, возникающих вследствие трансформации энергии наведенных токов в энергию излучения полупроводниковой структуры;

– проведен выбор диапазона параметров экспериментальных исследований, моделирующих воздействие импульсного электромагнитного поля на работоспособность полупроводниковых диодов в области необратимых отказов;

– получено экспериментальные данные влияния импульсного электромагнитного излучения с параметрами необратимых отказов на рабочие (вольт – амперные, температурные) характеристики полупроводниковых диодов (диод Д 312 А, структуры Si-Au-Ge);

– проведено сравнительный анализ экспериментальных данных и количественных характеристик необратимых отказов для данных приборов, полученных расчетным путем, для обоснования достоверности предложенных в работе физических моделей возникновения необратимых отказов и методов их количественных оценок.

Список литературы: 1. *Мырова Л.О.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / *Л.О.Мырова, А.З.Чешженко.* – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И.* Электромагнитные влияния на сооружения связи / *М.И.Михайлов, Л.Д.Разумов, С.А.Соколов.* – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела / *М.Стил, Б.Вюраль.* – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н.* Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / *Н.Н.Белецкий, В.М.Светличный, Д.Д.Халамейда, В.М.Яковенко.* – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов / *С.Зи.* – М.: Мир, 1984. – 456 с. 6. *Кравченко В.И.* Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий / *В.И.Кравченко, В.И.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – №

11. – С. 62–69. 7. *Кравченко В.И.* Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161. 8. *Кравченко В.И.* Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161–169. 9. *Кравченко В.И.* Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83–89. 9. *Кравченко В.И.* Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89–96. 10. *Кравченко В.И.* Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103. 11. *Кравченко В.И.* Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / *В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С.103–111.

Bibliography (transliterated): 1. *Myrova L.O., Chepizhenko A.Z.* Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235. Print. 2. *Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A.* Jelektromagnitnye vlijanja na sooruzhenija svyazi. – Moscow: Radio i svjaz', 1979. 225. Print. 3. *Stil M., Vjural' B.* Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312. Print. 4. *Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M.* Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kyiv: Naukova dumka, 1991. 216. Print. 5. *Zi C.* Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir, 1984. 456. Print. 6. *Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie storonnego jelektromagnitno izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhij jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. 62 – 69. Print. 7. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 154–161. Print. 8. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Generacija jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jelektromagnitno vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 161–169. Print. 9. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie potoka zarjazhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhij jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 83–89. Print. 9. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Vlijanie storonnego jelektromagnitno izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 89–96. Print. 10. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitno izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 96–103. Print. 11. *Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V.* Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitno izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 103–111. Print.

Postynula (received) 13.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, professor, director of NIPKI "Molnija" NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department Information System of NTU "KhPI", tel. (057) 707-66-18, e-mail: :saa@kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidat of Technical Sciences, docent, professor of the Department Information System of NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of Information NTU "KhPI". Tel. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 544.323.2:544.56.1:621.762

Е. В. ЛИПЯН, О. Н. СИЗОНЕНКО, А. С. ТОРПАКОВ, А. А. ЖДАНОВ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕТЕРОГЕННЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В СИСТЕМЕ «СМЕСЬ ПОРОШКОВ Fe – Ti – УГЛЕВОДОРОДНАЯ ЖИДКОСТЬ» ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Приведен термодинамический анализ химического равновесия для смеси порошков железа и титана в среде углеводородной жидкости под воздействием высоковольтных электрических разрядов. Теоретически обоснована возможность получения карбидов и интерметаллидов из исходной смеси и определены необходимые для этого уровни температуры и давления. Полученные теоретические результаты подтверждены экспериментально при синтезе TiC, Fe₃C и Fe₂Ti.

Ключевые слова: термодинамика, энергия Гиббса, парциальное давление, высоковольтный электрический разряд, углеводородная жидкость, синтез, карбиды металлов, интерметаллиды, порошки, рентгенофазовый анализ, гетерогенные реакции, дисперсная система.

Введение. Известно, что обработка материалов концентрированными потоками энергии (КПЭ) вызывает интенсификацию физико-химических процессов в зоне их локального воздействия [1–3]. Высокая удельная энергия и быстротечность процессов приводят к формированию термодинамически неравновесных систем, в результате чего создается возможность получения высокодисперсных структур, вплоть до аморфных и наноструктур.

Высокоэнергетический комплекс физических процессов, которые сопровождают высоковольтные электрические разряды (ВЭР) в дисперсной системе «углеводородная жидкость – металлический порошок», используют для синтеза наноуглерода, диспергирования порошков металлов и синтеза их карбидов за счет действия плазменного канала, электромагнитных полей, механического воздействия ударных волн, гидротоков и объемной микрокавитации [3].

Оптимизация условий для интенсификации гетерогенных химических реакций будет зависеть от процессов, протекающих между газовой, жидкой и твердой фазами [4, 5]. Для выяснения закономерностей указанных процессов необходимы данные о фазовых равновесиях и фундаментальных термодинамических функциях соответствующих систем.

Цель данной работы – выполнить термодинамический анализ поведения дисперсной системы «смесь порошков Fe – Ti – углеводородная жидкость» при воздействии на нее ВЭР.

Методика термодинамического анализа. Известно,

но, что при ВЭР температура плазмы в канале разряда может достигать $\sim 10^4$ K, а давление ~ 1 ГПа [6]. Для оценки процессов с учетом протекания возможных реакций и образования их конечных продуктов использован термодинамический анализ равновесных процессов, который применяется в теории металлургии и сварки для прогнозирования хода реакций. При использовании данного метода допускается, что, несмотря на кратковременность процесса, высокие температуры нагрева металла и большая удельная поверхность его контакта со средой практически обеспечивают достижение термодинамического равновесия [7]. Кроме того, в работе [8] подчеркивается, что при разряде вследствие кратковременности импульсов термодинамические процессы могут рассматриваться как адиабатические.

Термодинамические расчеты основаны на значениях величин энтальпии H , энтропии S , теплоемкости C_p и энергии Гиббса G для химических веществ. Характер изменения энергии Гиббса позволяет судить о принципиальной возможности осуществления процесса [9–11].

Все подсчеты по таблицам стандартных величин основаны на свойствах аддитивности G , H , S и поэтому сводятся к алгебраическому суммированию, аналогичному расчетам по закону Гесса [9–11]. Теплоемкость C_p определялась по уравнению Майера-Келли с помощью табличных данных, после чего рассчитывались значения изменения энтальпии ΔH и энтропии ΔS согласно закона Кирхгофа. Изменение энер-

гии Гиббса для веществ определялось по закону Гиббса-Гельмгольца с использованием полученных значений ΔH_T и ΔS_T [10, 11].

Барическая зависимость изменения энергии Гиббса ΔG_p при изменении давления от величины P_0 до P для твердых веществ и жидкостей, принимая, что молярный объем $V_m(P) = \text{const}$, имеет вид:

$$\Delta G_p = \int_{P_0}^P V_m(P) dP = V_m \cdot (P - P_0) = \frac{M}{\rho} \cdot (P - P_0), \quad (1)$$

где M – молярная масса; ρ – плотность.

Для случая идеального газа:

$$\Delta G_p = \int_{P_0}^P V_m(P) dP = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – температура [9–12].

Расчет величины логарифма давления паров производился по формуле:

$$\lg(p) = A \cdot T^{-1} + B \cdot \lg T + C \cdot T + D, \quad (3)$$

где A, B, C, D – коэффициенты согласно [10].

Если при каждой заданной температуре T решать уравнение равновесия реакции $\Delta G = 0$ относительно давления P , то мы получим набор пар точек $(P_i - T_i)$, которые представляют собой кривую равновесия в координатах давление – температура. Во всех точках этой линии реакция находится в равновесии и, следовательно, продукты и реагенты реакции сосуществуют. Поскольку в общем случае в реакции может участвовать более одного газа, при расчетах использовались мольнодольные концентрации газов в системе. Таким образом, возможность протекания реакции будет определяться не только параметрами PT , но и соотношением газов во флюиде. Построение диаграмм состояния для веществ в газовой фазе проводилось в программе HSC Chemistry 6.

Результаты и обсуждение. В работах [3, 12] в качестве углеводородной жидкости при ВЭР обработке металлических порошков использовался керосин, который состоит из смеси жидких углеводородов (содержание углерода – от C_8 до C_{15}). В работе [13] для расчетов предлагается применять модельный аналог керосина, состоящий из десяти углеводородов разных структурных групп. Рассмотрим следующие суммарные реакции разложения составляющих модельного аналога керосина (жидкая и газовая фазы):

- 1) н-октан C_8H_{18} (ж/г) = $8C + 9H_2$ (г);
- 2) н-декан $C_{10}H_{22}$ (ж/г) = $10C + 11H_2$ (г);
- 3) н-додекан $C_{12}H_{26}$ (ж/г) = $12C + 13H_2$ (г);
- 4) н-тридекан $C_{13}H_{28}$ (ж/г) = $13C + 14H_2$ (г);
- 5) н-тетрадекан $C_{14}H_{30}$ (ж/г) = $14C + 15H_2$ (г);
- 6) н-гексадекан $C_{16}H_{34}$ (ж/г) = $16C + 17H_2$ (г);
- 7) метилциклогексан C_7H_{14} (ж/г) = $7C + 7H_2$ (г);
- 8) транс-1, 3-диметилциклопентан C_7H_{14} (ж/г) = $7C + 7H_2$ (г);
- 9) пропилбензен C_9H_{12} (ж/г) = $9C + 6H_2$ (г);
- 10) 1-метилнафтален $C_{11}H_{10}$ (ж/г) = $11C + 5H_2$ (г).

Для всех составляющих модельного аналога для вышеприведенных реакций рассчитанная величина ΔG отрицательна как при разложении жидкой, так и

из газовой фазы (см. рис. 1). При этом с повышением давления равновесие реакций смещается влево на величину $\sim (n-1)RT \ln(P)$ (считая газы как идеальные), где n – коэффициент перед H_2 ; для реакции разложения н-октана при температуре 1000 К и давлении 5 МПа эта величина составит ~ 260 кДж/моль, а точка равновесия $\Delta G = 0$ смещается к температуре ~ 415 К. В целом же ВЭР воздействие на углеводородную среду плазменным каналом позволяет получать углерод, причем в различных фазовых состояниях.

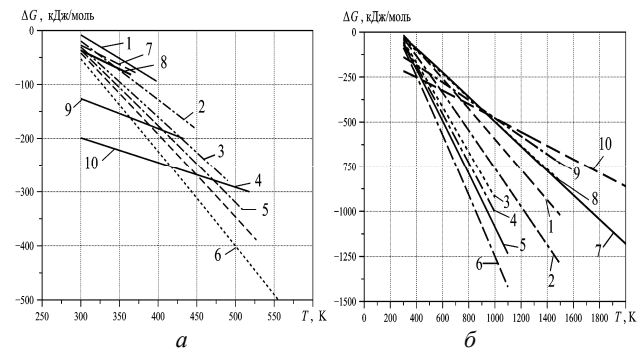


Рисунок 1 – Возможные реакции разложения составляющих модельного аналога керосина: а – в жидкой фазе; б – газовой фазе 1 – н-октан; 2 – н-декан; 3 – н-додекан; 4 – н-тридекан; 5 – н-тетрадекан; 6 – н-гексадекан; 7 – метилциклогексан; 8 – транс-1, 3-диметилциклопентан; 9 – пропилбензен; 10 – 1-метилнафтален

Результаты расчетов энергии Гиббса возможных реакций в системе «смесь порошков Fe – Ti – углеводородная жидкость» при разных температурах (рис. 2–4) показывают, что, уже начиная с температуры 300 К, возможны реакции между исходными компонентами порошковой смеси (рис. 2) с образованием интерметаллидов $FeTi$ и Fe_2Ti . Однако с ростом температуры до $T = 2289,9$ К для реакции $Fe + Ti \rightarrow FeTi$ и до $2524,9$ К для $2Fe + Ti \rightarrow Fe_2Ti$ их прохождение становится термодинамически невозможным, так как энергия Гиббса $\Delta G > 0$.

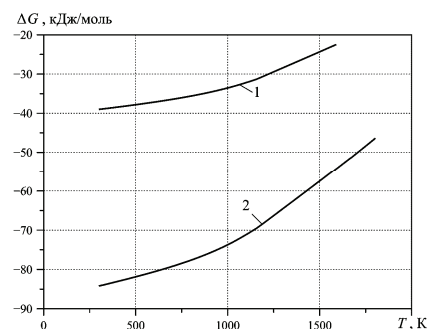


Рисунок 2 – Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакций между исходными компонентами порошковой смеси: 1 – $Fe + Ti \rightarrow FeTi$; 2 – $2Fe + Ti \rightarrow Fe_2Ti$

При реакциях между веществами, образованными в результате разложения углеводородной жидкости и исходными компонентами, возможно образование карбидов и гидридов металлов, а именно: TiC , Fe_3C , TiH_2 (см. рис. 3). Реакция образования карбида титана $Ti + C \rightarrow TiC$ термодинамически разрешена во всем

диапазоне рассматриваемых температур. Образование карбида железа $C + 3Fe \rightarrow Fe_3C$ становится возможным при температуре от 1064,4 К до температуры ~ 1500 К – начала разложения цементита Fe_3C , а также возможно прохождение обратимой реакции образования-разложения вплоть до температуры 2131,6 К. Реакция образования дигидрида титана $Ti + H_2 \rightarrow TiH_2$ проходит до температуры 1048,4 К, когда становится термодинамически невозможной и начинается обратный процесс разложения на титан и водород в случае отсутствия соседствующих продуктов предыдущих реакций.

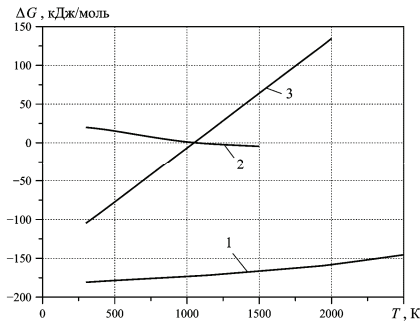


Рисунок 3 – Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакций между веществами, образованными при разложении углеводородной жидкости и исходными компонентами: 1 – $Ti + C \rightarrow TiC$; 2 – $C + 3Fe \rightarrow Fe_3C$; 3 – $Ti + H_2 \rightarrow TiH_2$

При прохождении гетерофазных реакций между образованными продуктами предыдущих реакций возможно как образование интерметаллидов и карбидов металлов, так и разложение на исходные компоненты (см. рис. 4). Ограничиваются данные реакции температурами разложения интерметаллидов и карбида железа.

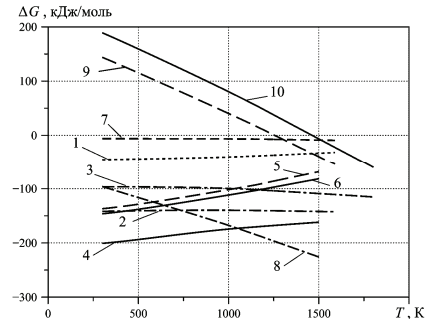


Рисунок 4 – Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для реакций между образованными продуктами предыдущих реакций: 1 – $FeTi + Fe \rightarrow Fe_2Ti$; 2 – $FeTi + C \rightarrow Fe + TiC$; 3 – $Fe_2Ti + C \rightarrow 2Fe + TiC$; 4 – $Fe_3C + Ti \rightarrow 3Fe + TiC$; 5 – $Fe_3C + 3Ti \rightarrow C + 3FeTi$; 6 – $Fe_3C + 1,5Ti \rightarrow C + 1,5Fe_2Ti$; 7 – $2FeTi \rightarrow Ti + Fe_2Ti$; 8 – $TiH_2 + Fe_3C \rightarrow TiC + 3Fe + H_2$; 9 – $TiH_2 + FeTi \rightarrow 2Ti + Fe + H_2$; 10 – $TiH_2 + Fe_2Ti \rightarrow 2Ti + 2Fe + H_2$

Вероятность прохождения реакции образования Fe_3C и $FeTi$ (см. табл. 1) многократно возрастает при участии в реакции газообразных компонентов.

Таблица 1 – Возможные реакции в системе Fe – Ti – C с газовой фазой одного из компонентов

№ реакции	Реакции	ΔG , кДж/моль			
		$T = 298,15$ К	$T = 900$ К	$T = 1700$ К	$T = 3500$ К
Реакции с участием твердого Ti					
1	$FeTi + Fe(r) \rightarrow Fe_2Ti$	-23,7	-18,3	-11,4	3,3
2	$FeTi \rightarrow Fe(r) + Ti$	23,3	17,9	10,8	-5,4
3	$FeTi + C(r) \rightarrow Fe(r) + TiC$	-25,3	-24,98	-24,2	-22,1
4	$Fe_2Ti \rightarrow 2Fe(r) + Ti$	47,0	36,2	22,2	-8,7
5	$Fe_2Ti + C(r) \rightarrow 2Fe(r) + TiC$	-1,6	-6,7	-12,9	-25,4
6	$Ti + C(r) \rightarrow TiC$	-48,7	-42,9	-35,0	-16,7
Реакции с участием твердого C					
7	$C + 3Fe(r) \rightarrow Fe_3C$	-62,2	-47,6	-29,3	9,3
8	$C + Ti(r) \rightarrow TiC$	-34,8	-29,4	-22,5	-7,9
9	$Fe_3C + Ti(r) \rightarrow 3Fe(r) + TiC$	27,4	18,2	6,8	-17,3
Реакции с участием твердого Fe					
10	$3Fe + C(r) \rightarrow Fe_3C$	-37,2	-32,7	-26,1	-7,3
11	$Fe + Ti(r) \rightarrow FeTi$	-26,7	-21,4	-14,3	2,1
12	$2Fe + Ti(r) \rightarrow Fe_2Ti$	-29,3	-23,8	-16,1	3,1
13	$0,333Fe_3C + Ti(r) \rightarrow 0,333C(r) + FeTi$	-14,3	-10,5	-5,7	4,6
14	$0,667Fe_3C + Ti(r) \rightarrow 0,667C(r) + Fe_2Ti$	-4,5	-1,97	1,3	8,0
15	$2FeTi \rightarrow Ti(r) + Fe_2Ti$	24,2	19,1	12,6	-1,1

Давление паров элементов значительно меняется с повышением температуры; так, если при температуре 1670 К для титана и железа указанная величина составляет $2,61 \cdot 10^{-7}$ Па и $4,72 \cdot 10^{-5}$ Па соответственно, при 1800 К – $2,78 \cdot 10^{-6}$ Па и $3,46 \cdot 10^{-4}$ Па (основная масса металла находится в твердом состоянии), то при 2000 К – $5,65 \cdot 10^{-5}$ Па и $1,32 \cdot 10^2$ Па, при 3000 К – $0,375$ и $2,97 \cdot 10^7$ Па (основная масса металлов в жидком состоянии). Скорость испарения с поверхно-

сти возрастает от величин $6,12 \cdot 10^{-9}$ г/(с · см²) для титана и $1,19 \cdot 10^{-6}$ г/(с · см²) для железа при 1670 К до $6,56 \cdot 10^{-3}$ г/(с · см²) и $5,61 \cdot 10^5$ г/(с · см²) соответственно при 3000 К.

Для оценки влияния давления на вероятность протекания реакций были построены диаграммы равновесия в системе Fe – Ti – C при разных температурах (см. рис. 5–7), которые позволяют определить, какая фаза образуется при заданных значениях темпе-

ратуры и давления паров двух элементов, взаимодействующих с третьим, находящимся в конденсированном состоянии.

Для температуры среды до $T = 900$ К при взаимодействии в системе Ti – газообразные Fe и C появляется возможность образования карбида титана TiC (см. рис. 5, а). Причем при неравновесном давлении компонентов в газовой фазе вероятность образования фаз изменяется. При сохранении давления паров Fe на уровне $p_{Fe(r)} = 10^3$ Па стабильной образующейся фазой будет уже TiC, которая будет сохраняться также при равных парциальных давлениях $p_{Fe(r)} = p_{C(r)} = 10^{12}$ Па.

Для системы C – газообразные Fe и Ti при температуре $T = 900$ К (см. рис. 6, а) появляется возможность образования карбида титана TiC при значительно большем (на несколько порядков) парциальном давлении паров титана, однако при $p_{Fe(r)} = p_{Ti(r)}$ сохраняется стабильность образования карбида железа Fe_3C .

Для температуры $T = 900$ К в системе Fe – газообразные C и Ti (см. рис. 7, а) имеется небольшая область существования карбида железа при малых значениях парциального давления для паров титана и значительных для паров углерода, однако стабильность области FeTi при равных парциальных давлениях $p_{C(r)} = p_{Ti(r)}$ также сохраняется.

При дальнейшем повышении температуры до $T = 1700$ К в системе Ti – газообразные Fe и C (см. рис. 5, б) сохраняется стабильность соединений, описанная выше.

Для системы C – газообразные Fe и Ti повышение температуры до $T = 1700$ К (см. рис. 6, б) расширяет область существования карбида титана TiC, при этом появляется возможность его образования даже при равных уровнях парциальных давлений вплоть до порядка $p_{Fe(r)} = p_{Ti(r)} = 10^4$ Па либо при уровне давления паров железа ниже $p_{Fe(r)} = 10^7$ Па.

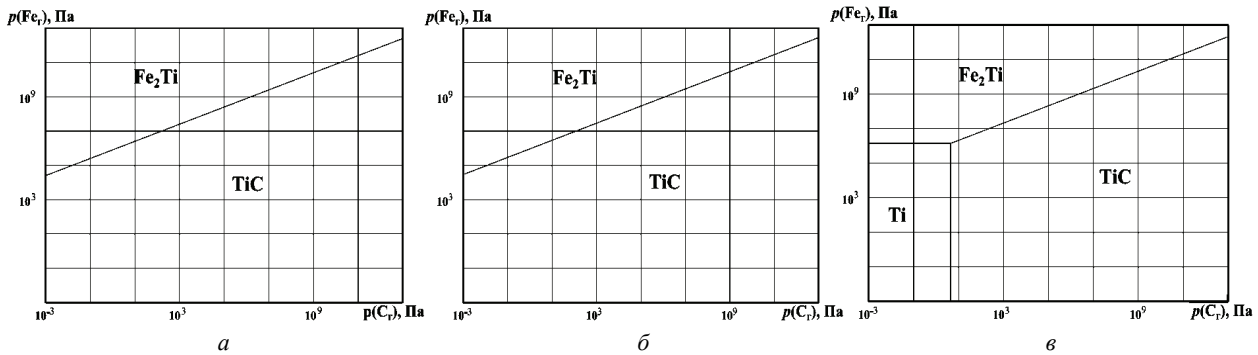


Рисунок 5 – Диаграммы равновесия системы Fe – Ti – C при реакциях с участием газовой фазы для твердого Ti при температурах: а – 900 К; б – 1700 К; в – 3500 К

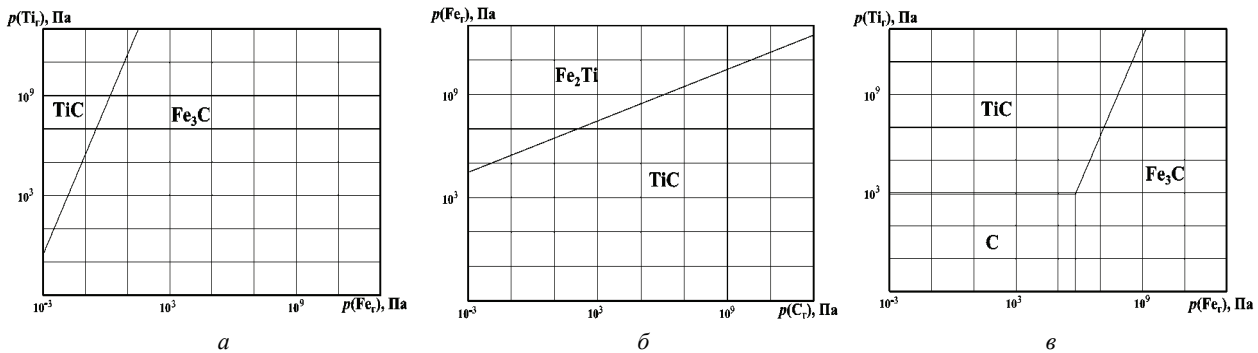


Рисунок 6 – Диаграммы равновесия системы Fe – Ti – C при реакциях с участием газовой фазы для твердого C при температурах: а – 900 К; б – 1700 К; в – 3500 К

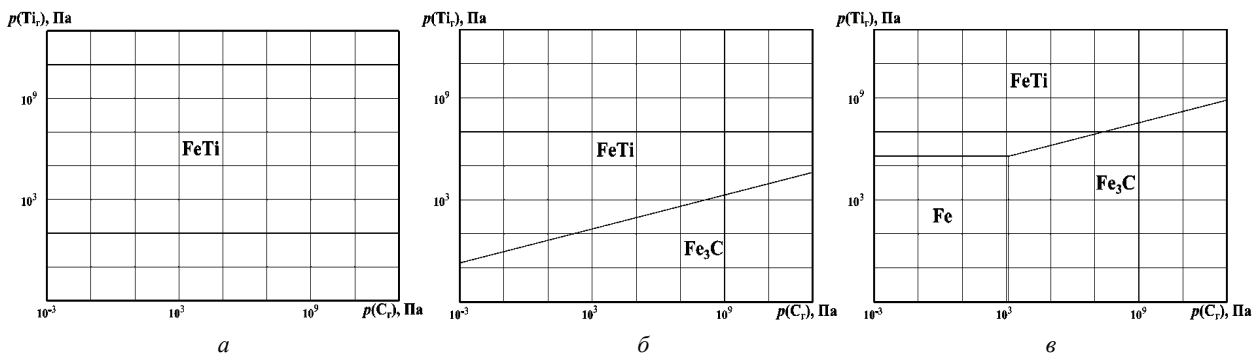


Рисунок 7 – Диаграммы равновесия системы Fe–Ti–C при реакциях с участием газовой фазы для твердого Fe при температурах: а – 900 К; б – 1700 К; в – 3500 К

Для определения роли водорода, образуемого при разложении углеводородной жидкости, рассмотрим тройную систему Ti – C – H (как составную часть системы Fe – Ti + углеводородная жидкость), в которой твердофазный титан взаимодействует с газообразными углеродом и водородом.

Результаты расчетов показывают, что реакция $Ti + C(g) \rightarrow TiC$ возможна во всем диапазоне температур. Температура равновесия реакции $Ti + H_2(g) \rightarrow TiH_2$ равна 1048,4 К, выше которой при стандартном давлении она проходить не может. Причем реакция $TiC + H_2(g) \rightarrow C(g) + TiH_2$ термодинамически запрещена в прямом направлении и может идти только в обратном с образованием карбида титана и водорода из образующегося дигидрида титана.

Таким образом, в рассматриваемой системе практически наиболее вероятным является получение карбида титана TiC.

Экспериментальные исследования. Внутренняя температура плазмы в канале разряда, которая достигает $\sim 10^4$ К, слабо зависит от величины энергии и времени ее выделения. Энергия, выделившаяся в канале разряда, идет в основном на нагрев вещества в канале разряда и на работу расширения канала над окружающей жидкостью. При этом оказывается, что энергия, идущая на нагрев вещества, сосредоточена в основной, сравнительно однородно прогретой части канала, в то время, как энергия, запасенная в тонком переходном слое от плазмы к жидкости, относительно невелика. Его толщина δ может быть оценена как:

$$\delta \sim 2\sqrt{\chi \cdot t}, \quad (4)$$

где χ – коэффициент температуропроводности; t – длительность первого полупериода разряда [6].

Таким образом, для разрядов в керосине толщина переходного слоя составляет микроны (например, для температуры 900 К и давления 4 МПа $\chi = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, при $t = 5 \text{ мкс}$ толщина слоя $\delta \approx 1,85 \text{ мкм}$), что является вполне достаточным для корректности оценок процессов, проходящих в данной области.

В работе [3] было проведено математическое моделирование процессов, происходящих при ВЭР в дисперсной системе «порошок – углеводородная жидкость» и выполнен теоретический анализ значений пиковых давлений и температур в канале разряда и на стенке камеры. Расчеты показали, что во всех исследуемых режимах температура внутриканальной области составляет от $2 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^4$ К, давление в канале разряда – от $0,5 \cdot 10^9$ до $1,5 \cdot 10^9$ Па, а на стенке камеры – от $1 \cdot 10^8$ до $2 \cdot 10^8$ Па. Термодинамический анализ, приведенный выше, показал, что при таких значениях температуры и давления возможно прохождение реакций между компонентами порошковой смеси и продуктами разложения углеводородной жидкости в результате деструкции углеводородных цепочек под действием плазменного канала разряда.

Оценка корректности проведенных теоретических расчетов была выполнена при ВЭР обработке смеси порошков 80 % Fe + 20 % Ti (по массе) на двух режимах, отличающихся запасаемой энергией

$W_1 = 1 \text{ кДж}$ и $W_1 = 4 \text{ кДж}$ при одинаковой удельной энергии обработки $W_{\text{уд}} = 40 \text{ МДж/кг}$.

Рентгенограммы, представленные на рис. 8, свидетельствуют, что при ВЭР обработке порошков в диапазоне исследуемых параметров происходит взаимодействие между компонентами порошковой смеси и наноуглеродом, в результате чего образуются карбиды TiC и Fe₃C и интерметаллид Fe₂Ti. Активный наноуглерод под действием волн сжатия-растяжения может проникать как в структуру порошка (с образованием TiC и Fe₃C), так и распределяться на его поверхности, активируя его. Отмечается существенное уменьшение интенсивности всех дифракционных максимумов и значительное их расширение, что может быть связано с диспергированием частиц порошка, неомогенностью обработанных порошков, увеличением микронапряжений в частицах, вызванных структурными искажениями и дефектами в кристаллических решетках [14].

Выводы. Проведен термодинамический анализ поведения дисперсной системы «смесь металлических порошков – углеводородная жидкость» при воздействии на нее ВЭР.

Теоретически обоснована возможность деструкции углеводородной жидкости на наноуглерод и водород плазменным каналом ВЭР и возможность прохождения реакций между компонентами порошковой смеси и продуктами разложения углеводородной жидкости, установлены параметры, при которых возможны указанные химические реакции – уровни температуры и давления.

В результате термодинамического анализа установлено, что в результате реакции титана с газообразными углеродом и железом при температуре 300 К образуется Fe₂Ti; при взаимодействии железа и титана, находящихся в газовой фазе, с конденсированным углеродом – Fe₃C; при взаимодействии титана и углерода, находящихся в газовой фазе, с конденсированным железом – FeTi; в твердой фазе образование карбидов и интерметаллидов возможно при температуре, превышающей ~ 1100 К; карбид титана может образовываться из любых фаз при реакции двухкомпонентной системы Ti + C, начиная от температур 300 К, но в случае трехкомпонентной системы с двумя газообразными реагентами необходим нагрев и повышение парциального давления газовой фазы от 10^3 до 10^7 Па при 3500 К в системах «конденсированный C – газообразные Fe и Ti» и «конденсированный Ti – газообразные Fe и C».

Корректность термодинамического анализа подтверждена рентгенофазовым анализом порошковой смеси Fe – Ti – C после ВЭР воздействия – установлен синтез карбидов TiC, Fe₃C и интерметаллида Fe₂Ti.

Полученные данные позволили выявить закономерности процессов, происходящих при ВЭР обработке порошков металлов в углеводородной жидкости, благодаря чему открываются возможности выполнять рациональное проектирование реакторов и технологических приемов ВЭР обработки порошков с целью получения шихты для производства материала

лов, дисперсно-упрочненных карбидами металлов.

С точки зрения технологии интенсификации прохождения химических реакций (без учета фактора размера реагирующих частиц) более выгодным является осуществление большого числа микроплазменных каналов по сравнению с одним большим каналом.

Работа выполнена при частичной поддержке Гранта НАН Украины научно-исследовательских работ молодых ученых в 2015 г. (тема № П-18-15, № ГР 0115U003864).

Список литературы: 1. Булычев С. И. Теоретические основы обработки концентрированными потоками энергии / С. И. Булычев. – М.: МГИУ, 2008. – 148 с. 2. Скороход В. В. Физико-химическая кинетика в наноструктурных системах / В. В. Скороход, И. В. Уварова, А. В. Разуля. – К.: Академперіодика, 2001. – 180 с. 3. Сизоненко О. Н. Влияние электроразрядного воздействия на композицию порошков Fe–Ti–B₄C / О. Н. Сизоненко, Г. А. Баглюк, А. А. Мамонова [и др.] // Наукові нотатки: міжвузівський зб. (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). – Луцьк: ЛНТУ, 2011. – Вип. 31. – С. 333–343. 4. Бацанов С. С. Химические реакции под действием ударного сжатия / С. С. Бацанов // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах: сб. науч. тр. / отв. ред. Ф. И. Дубовицкий. – Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978. – С. 126–131. 5. Трофимов В. С. О возможности ускорения реакции и диффузии в ударном фронте детонации / В. С. Трофимов // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах: сб. науч. тр. / отв. ред. Ф. И. Дубовицкий. – Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978. – С. 11–16. 6. Наугольных К. А. Электрические разряды в воде / К. А. Наугольных, Н. А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с. 7. Коновалов А. В. Теория сварочных процессов: учеб. для вузов / А. В. Коновалов, А. С. Куркин, Э. Л. Макаров и др.; под ред. В. М. Неровного. – М.: МГТУ, 2007. – 752 с. 8. Лазаренко Б. Р. Современный уровень развития электроискровой обработки металлов и некоторые научные проблемы в этой области / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко // Электроискровая обработка металлов. – М.: АН СССР, 1957. – Вып. 1. – С. 9–37. 9. Булатов Н. К. Термодинамика необратимых физико-химических процессов / Н. К. Булатов, А. Б. Лундин. – М.: Химия, 1984. – 336 с. 10. Верятин У. Д. Термодинамические свойства неорганических веществ: справочник / У. Д. Верятин, В. П. Маширевич, Н. Г. Рябцев и др.; под ред. А. П. Зефирова. – М.: Атомиздат, 1965. – 460 с. 11. HSC Chemistry. Pdf download centre / HSC Chemistry. – Режим доступа:

<http://www.hsc-chemistry.net/download.htm>. – Дата обращения: 15 октября 2015. 12. Пат. 97890 Украина, МПК (2012.01) C01B 31/30 (2006.01), B01J 3/06 (2006.01), B22F 9/14 (2006.01), B82B 3/00. Спосіб одержання карбідів металів перехідної групи / Сизоненко О. М., Тафтій Е. І., Райченко О. І. та ін.; заявник і патенто власник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № a201011723; заявл. 01.10.10; опубл. 26.03.12, Бюл. № 6. – 6 с. 13. Zhong F. Q. Heat Transfer of Aviation Kerosene at Supercritical Conditions / F. Q. Zhong, X. J. Fan, G. Yu [et al.] // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2009. – № 23(3). – P. 543–550. 14. Уманский Я. С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, Ю. А. Иванов, Л. Н. Рапортуев. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bulychev, S. I. Teoreticheskie osnovy obrabotki koncentrirovannymi potokami jenergii. Moscow: MGIIU, 2008. Print. 2. Skorokhod, V. V., I. V. Uvarova and A. V. Razulya. Fizyko-khimichna kinetyka v nanostrukturnykh systemakh. Kyiv: Akademperiodyka, 2001. Print. 3. Sizonenko, O. N., et al. "Vlijanie jelektrorazrjadnogo vozdejstvija na kompoziciju poroshkov Fe–Ti–B₄C." Naukovi notatky. No. 31. 2011. 333–343. Print. 4. Bacanov, S. S. "Himicheskie reakcii pod dejstviem udarnogo szhatija." Detonacija. Kriticheskie javlenija. Fiziko-himicheskie prevrashhenija v udarnykh volnah. Ed. F. I. Dubovickij. Chernogolovka: OIHF AN SSSR, 1978. 126–131. Print. 5. Trofimov, V. S. "O vozmozhnosti uskorenija reakcii i diffuzii v udarnom fronte detonacii." Detonacija. Kriticheskie javlenija. Fiziko-himicheskie prevrashhenija v udarnykh volnah. Ed. F. I. Dubovickij. Chernogolovka: OIHF AN SSSR, 1978. 11–16. Print. 6. Naugol'nyh, K. A., and N. A. Roj. Jelektricheskie razrjady v vode. Moscow: Nauka, 1971. Print. 7. Konovalov, A. V., et al. Teorija svarochnyh processov. Ed. V. M. Nerovnyj. Moscow: MGIIU, 2007. Print. 8. Lazarenko, B. R., and N. I. Lazarenko. "Sovremennyj uroven' razvitiija jelektrorazrjadnoj obrabotki metallov i nekotorye nauchnye problemy v jetoj oblasti." Jelektrorazrjadnaja obrabotka metallov. No. 1. 1957. 9–37. Print. 9. Bulatov, N. K., and A. B. Lundin. Termodinamika neobratimyh fiziko-himicheskih processov. Moscow: Himija, 1984. Print. 10. Verjatin, U. D., et al. Termodinamicheskie svojstva neorganicheskikh veshhestv. Ed. A. P. Zefirov. Moscow: Atomizdat, 1965. Print. 11. HSC Chemistry. "Pdf download centre." Web. 15 October 2015 <<http://www.hsc-chemistry.net/download.htm>>. 12. Syzonenko, O. M., et al. "Process for the preparation of metal carbides of transition group." Patent of Ukraine 97890. 26 March 2012. Print. 13. Zhong, F. Q., et al. "Heat Transfer of Aviation Kerosene at Supercritical Conditions." Journal of Thermophysics and Heat Transfer. No. 23. 2011. 543–550. Print. 14. Umanskiy, Ja. S., et al. Kristallografija, rentgenografija i jelektronnaja mikroskopija. Moscow: Metallurgija, 1982. Print.

Поступила (received) 15.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Липян Евгений Васильевич – Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, г. Николаев, младший научный сотрудник; тел.: (093) 592-90-45; e-mail: lypian@ukr.net.

Lypian Yevhen Vasylovych – Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, Research Assistant; tel.: (093) 592-90-45; e-mail: lypian@ukr.net.

Сизоненко Ольга Николаевна – доктор технических наук, профессор, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев, ведущий научный сотрудник; тел.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

Syzonenko Olha Mykolayivna – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, Leading Researcher; tel.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

Торпакон Андрей Сергеевич – Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, г. Николаев, младший научный сотрудник; тел.: (093) 846-93-58; e-mail: torpakov@gmail.com.

Torpakov Andriy Serhiyovych – Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, Research Assistant; tel.: (093) 846-93-58; e-mail: torpakov@gmail.com.

Жданов Александр Александрович – кандидат технических наук, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев, инженер; тел.: (067) 385 37 68; e-mail: reyh33@yandex.ru.

Zhdanov Oleksandr Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences (PhD), Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv, engineer; tel.: (067) 385-37-68; e-mail: reyh33@yandex.ru.

УДК 621.315.615 : 621.319.4

*А.П. МАЛЮШЕВСЬКА, С.О. ТОПОРОВ***ВИВЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ПОЛІМЕТИЛСИЛОКСАНОВОЇ РІДИНИ ПРИ ЇЇ КОНТАКТУВАННІ З ПЛІВКОВИМИ
ЕЛЕМЕНТАМИ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ
КОНДЕНСАТОРІВ ПІД ДІЄЮ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР**

Вивчено зміну електрофізичних властивостей поліметилсилоксанової (ПМС) рідини як такої, що може використовуватися для просочення плівкових діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів. Визначено низьку ступінь термостимульованої взаємодії поліметилсилоксанової рідини з поліпропіленовою та поліетилентерефталатними плівками. На прикладі рідини ПМС–20 показано високу термостабільність електрофізичних властивостей органосилоксанових рідин за винятком високої чутливості її короткочасної електричної міцності до виникнення електророзрядних явищ.

Ключові слова: просочений плівковий діелектрик, органосилоксанові рідини, короткочасна електрична міцність.

Вступ. Конденсаторні просочуючі рідини є надзвичайно важливим й у той же час досить проблемним компонентом діелектричної системи. До них пред'являються жорсткі вимоги, такі як: високі питомий об'ємний опір і діелектрична проникність; малий тангенс кута діелектричних втрат; мала в'язкість у робочому діапазоні температур; висока стабільність електричних характеристик; стійкість до впливу електричних і теплових полів конденсатора; хімічна стійкість; сумісність із компонентами діелектричної системи й конструктивних матеріалів; мала випаровуваність; висока температура кипіння; нетоксичність; негорючість; екологічність [1]. Ці вимоги суперечливі й не можуть бути повністю реалізовані, що призводить до обмежень при експлуатації електроізоляційних рідин.

Проведені в ІПТ НАН України дослідження [2] показали, що підвищення питомих енергетичних характеристик, ресурсу і частоти проходження зарядів розрядів високовольтних імпульсних конденсаторів може бути досягнуто при застосуванні в якості робочого діелектрика секцій конденсаторів комбінованої поліпропіленово-поліетилентерефталатної плівкової ізоляції, просоченої неполярною рідиною з низьким тангенсом кута діелектричних втрат. Використання плівкового діелектрика дозволяє створювати конденсатори з більш високими питомими характеристиками й низькими діелектричними втратами в порівнянні з конденсаторами на основі паперово-плівкового діелектрика. Але неминучим для внутрішньої ізоляції електроустановки є старіння, яке являє собою погіршення електричних характеристик у процесі експлуатації. Розрізняють три основні форми старіння діелектриків - іонізаційну, теплову, електрохімічну. Загальновідомим є той факт, що при будь-яких формах старіння найбільш слабкою ланкою є просочуюча рідина [1].

Теплова форма старіння характерна для усіх компонентів просоченої діелектричної системи високовольтних електротехнічних пристроїв. Відомо, що експлуатація високовольтних імпульсних конденсаторів пов'язана з тепловиділенням, яке обумовлене наявністю втрат в робочому діелектрику, струмовідних частинах та додаткових втрат в корпусній ізоляції. Головними ознаками теплового старіння просочуючої рідини є її термоокисна деструкція та термостимульо-

вана взаємодія з іншими елементами просоченої діелектричної системи.

Особливу увагу привертає можливість використання в якості електроізоляційних матеріалів рідких кремнійорганічних полімерів, які є високомолекулярними сполуками, що містять атоми кремнію в мономерній ланці. Перед усім поліорганосилоксани характеризуються високою термостійкістю, обумовленою високою енергією зв'язку Si-O, а також відмінними діелектричними характеристиками. З кремнійорганічних рідин варто звернути увагу на поліметилсилоксанові (ПМС), які мають високу нагрітостійкість, хімічну інертність, низьку гігроскопічність, низьку температуру застигання, високі електричні характеристики в широкому інтервалі частот і температур [3]. Діелектричні властивості поліметилсилоксанових рідин роблять їх перспективними і для використання в силовому конденсаторобудуванні, особливо в умовах роботи конденсаторів при підвищених температурах оточуючого середовища. Такі умови виникають, наприклад, при експлуатації високовольтних імпульсних конденсаторів в складі заглибних пристроїв для електророзрядної обробки призабійних зон нафтових та водозабірних свердловин, глибина яких може сягати декількох тисяч метрів, а температура всередині коливається від 60 до 100 °С. На сьогодні використання ПМС як просочуючої рідини для конденсаторів відомо, однак інформація про дослідження її властивостей стосовно до силових конденсаторів, що працюють при підвищеній температурі, практично відсутня.

Метою даної роботи було встановлення факторів, що впливають на працездатність поліметилсилоксанової рідини як рідкого електроізолюючого компонента просоченої діелектричної системи високовольтних імпульсних конденсаторів під впливом підвищеної температури.

Необхідно відзначити, що визнаним серйозним недоліком, що знижує надійність і працездатність плівкового просоченого діелектрика, а також конденсатора в цілому, є погіршення електрофізичних характеристик плівки й рідини внаслідок поступового розчинення полімеру в рідкому діелектрику. Ступінь такої взаємодії зазвичай визначається хімічним складом і будовою компонентів діелектричної системи секції

конденсатора [4]. Взаємодія може реалізуватися як набрякання плівки з наступним розчиненням переважно аморфної складової полімеру й переходом іонів металів, що знаходяться в ній, іоногенних домішок і технологічних забруднень в просочуючу рідину.

Методика експерименту. При дослідженні впливу полімерної плівки на діелектричні втрати просочуючої рідини (ПМС-20 ДСТУ 13032-77), дотримувались наступного співвідношення компонентів: 15 мас. частин рідини на 1 мас. частину полімерної плівки. Використовувалися двостороннє шорстка поліпропіленова плівка TERVAKOSKI FILM марки RER товщиною 10 мкм, гладка поліпропіленова плівка ТУ 619-057-65-87 товщиною 10 мкм і гладка поліетилентерефталатна плівка ПЭТ-КЭ ДСТУ 24234-80 товщиною 15 мкм, як такі, що активно застосовуються в сучасному конденсаторобудуванні. Зразки плівок являли собою стрічки шириною 80 мм, та довжиною, що відповідала вищенаведеному масовому співвідношенню рідина-плівка. Зразки плівок попередньо висушувалися при температурі 60 °С протягом двох годин у повітряному середовищі і поміщалися в скляні ємності. Потім плівки заливалися попередньо відфільтрованою, висушеною і дегазованою поліметилсилоксановою рідиною, після чого ємності встановлювалися в термостат. Крім того, температурному впливу піддавалися зразки ПМС рідини без плівки. Температура старіння зразків рідини (з плівками і без них) витримувалась постійною – 100 °С. Загальний час старіння становив 300 годин, кожні 50 годин проводилися виміри тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg } \delta$), діелектричної проникності (ϵ), питомого об'ємного електричного опору (ρ_V) відповідно до ДСТУ 6581-75. Температура, при якій проводили виміри цих електрофізичних характеристик була постійною – 100 °С. Після нагрівання протягом 150 і 300 годин знімалися також залежності тангенса кута діелектричних втрат проб рідини від температури (у діапазоні від 25 до 100 °С), на основі яких планувалася побудова залежностей $\ln(\text{tg } \delta) = f(1/T)$, необхідних для оцінки енергії активації провідності згідно [5]. На цих етапах термостаріння ПМС рідини для отримання інформації щодо можливого впливу термоокисної деструкції на її експлуатаційні властивості проводилось також вимірювання короткочасної електричної міцності відповідно до ДСТУ 6581-75.

Результати і обговорення. Термостаріння протягом 300 годин в присутності полімерних плівок не виявило помітного впливу на діелектричну проникність і питомий об'ємний електричний опір рідини ($\epsilon_{\text{сп}} = 2,78 \pm 0,04$, $\rho_{V\text{сп}} = (1,16 \pm 0,04) \cdot 10^{12}$ Ом·м), причому не було виявлено чітких закономірностей змін цих параметрів. Такі коливання електрофізичних характеристик не можуть бути прийняті як показові для оцінювання ступеня взаємодії рідкого і твердого діелектриків та інтенсивності термоокисної деструкції ПМС рідини.

З метою вивчення зміни енергії активації провідності, якості конкретної партії ПМС рідини та її схи-

льності до зміни діелектричних властивостей в результаті термоокисної деструкції проби вихідної і зістареної без плівок протягом 150 і 300 годин ПМС рідини були досліджені згідно ДСТУ 6581-75, що дозволило отримати температурні залежності $\text{tg } \delta$. Важливо, що тангенс кута діелектричних втрат змінювався дуже незначним чином в ході термостаріння самої поліметилсилоксанової рідини. Його середнє значення становило для вихідної ПМС рідини – 0,0008; після термостаріння протягом 150 годин – 0,00083; після термостаріння протягом 300 годин – 0,00085, тобто максимальний прийнятий в цих дослідженнях час старіння призводить до збільшення тангенса кута діелектричних втрат на величину близько 6%. Спроба отримати залежності $\ln(\text{tg } \delta) = f(1/T)$ для встановлення зміни енергії активації електричної провідності ПМС рідини в ході її термостаріння показали, що енергія активації ПМС рідини не залежить від часу термовпливу у межах експерименту (300 год).

Після термостаріння ПМС рідини разом з плівковими компонентами твердого конденсаторного діелектрика також були отримані температурні залежності тангенса кута діелектричних втрат. Але, як і у випадку термостаріння без плівок ПМС, рідина показала високу термостабільність: по мірі збільшення температури тангенс кута діелектричних втрат збільшується дуже незначно (не більше ніж на 8–9%). Таким чином, діелектричні втрати і енергія активації провідності ПМС рідини практично не залежать від температурного впливу і від присутності в ній поліпропіленової або поліетилентерефталатної плівок. Можливо, для ПМС рідини, що контактувала в ході термостаріння з поліпропіленовою та поліетилентерефталатною плівками, невелике зростання тангенса кута діелектричних втрат обумовлено не стільки взаємодією безпосередньо плівок і рідини, скільки переходом в рідину забруднень, неминуче наявних на поверхні плівок.

Для кількісної оцінки ступеню зміни діелектричних втрат просочуючої електроізоляційної рідини в ході термостаріння в контакт з різними полімерними плівками вивчався коефіцієнт дестабілізації, який визначався відношенням тангенса кута діелектричних втрат рідини після старіння із плівкою до тангенса кута діелектричних втрат рідини після старіння без плівки. Тут ПМС рідина також показала дуже високу термостабільність, в тому числі і при термостарінні в присутності поліетилентерефталатної і поліпропіленової плівок протягом 300 годин. Коефіцієнт дестабілізації коливався для неї близько значення 1 без чітких закономірностей. Це підтверджує інертність досліджуваної ПМС рідини по відношенню до досліджуваних полімерних плівок і в той же час виключає можливість контролю цієї характеристики ПМС рідини в якості електроізоляційної при проведенні натурних випробувань.

Вивчення впливу термостаріння ПМС рідини на стабільність її короткочасної електричної міцності ($E_{\text{нр}}$) показало наступне. Спочатку середнє значення короткочасної електричної міцності рідин визначалося за даними 10 послідовних пробів заповненої електроізоляційною рідиною комірки, з інтервалами між ними

5 хвилин. Після кожного пробою рідина між електродами акуратно перемішувалася, для видалення продуктів розкладання з міжелектродного проміжку згідно ДСТУ 6581-75, п.4.2.4. Результати досліджень по визначенню короточасної електричної міцності рідких діелектриків наведені в таблиці 1. Але, отримані високі значення коефіцієнта варіації (35 і 27% після нагріву протягом 150 і 300 годин відповідно), обчислені для середнього значення $E_{пр}$ ПМС рідини, не дозволяють говорити про однорідність ряду вимірюваних значень і високу достовірність отриманих даних.

Аналіз залежності $E_{пр}$ ПМС рідини від числа пробовів (рис. 1) дозволив припустити, що в результаті пробою ПМС рідини в ній відбуваються зміни, які знижують достовірність подальших одержуваних даних по короточасній електричній міцності. Такі результати потребували перегляду методики визначення короточасної електричної міцності досліджуваної електроізоляційної рідини.

Таблиця 1 – Короточасна електрична міцність ПМС рідини в ході термостаріння

Стан рідини	Умови проведення вимірювань			
	Дані отримані шляхом вимірювання згідно ДСТУ 6581-75, п.4.2.4		Дані отримані шляхом вимірювання згідно ДСТУ 6581-75, п.4.2.5	
Рідина у вихідному стані	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	19,9±5,4	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	26,0±1,8
	$K_{вар}$, %	16	$K_{вар}$, %	6
Рідина після 150 год нагрівання	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	7,0±3,8	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	17,5±1
	$K_{вар}$, %	35	$K_{вар}$, %	4
Рідина після 300 год нагрівання	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	3,9±1,6	$E_{пр ср} \pm \Delta E$, кВ/мм	9,6±2,0
	$K_{вар}$, %	27	$K_{вар}$, %	17

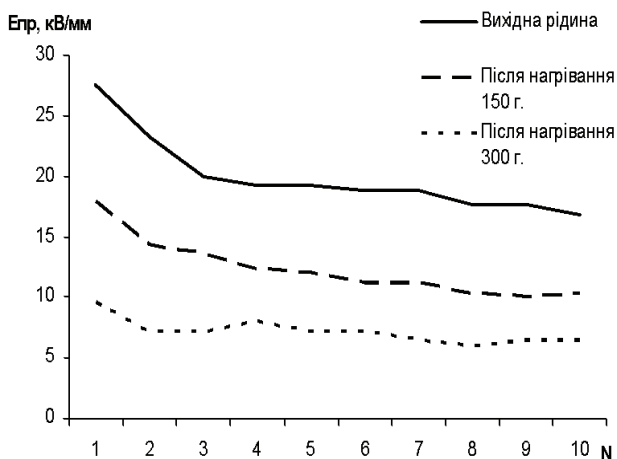


Рисунок 1 – Залежність короточасної електричної міцності від числа пробовів для ПМС рідини

Скориставшись ДСТУ 6581-75, п. 4.2.5, провели наступний експеримент. Кожен пробій ПМС рідини здійснювали в окремі порції рідини, взятій з однієї і

тієї ж проби, отримані результати наведені в табл. 1. Таким шляхом були отримані дані, достовірність яких значно вища (коефіцієнт варіації не перевищує 17%). Абсолютні значення середньої короточасної електричної міцності ПМС рідини, виміряної таким способом, виявилися вище (в 1,3 рази для вихідної рідини, в 2,5 рази – для рідини після термостаріння протягом 150 годин, в 2,46 рази – для рідини після 300 годин нагрівання), ніж рідини, підданої пробою без заміни порцій в комірці.

Одночасно з цим експериментом проводилось за тою же методикою дослідження зміни експлуатаційних властивостей нафтового масла (трансформаторне масло Т-1500) в результаті його термостаріння. Спроби побудувати залежності короточасної електричної міцності для проб трансформаторного масла не дали аналогічної закономірності зміни короточасної електричної міцності від числа пробовів.

Отримані дані представляють безсумнівний практичний інтерес. Стабільність електрофізичних властивостей ПМС рідини, підданої термовпливу, а також її інертність по відношенню до поліпропіленової і поліетиленетерефталатної плівок не викликає сумнівів: тривале термостаріння, в тому числі в присутності таких плівок, не показало істотного впливу ані на тангенс кута діелектричних втрат, ні на енергію активації провідності, ні на діелектричну проникність, ні на питомий об'ємний опір. З іншого боку, в даний час електричний пробій органосилоксанових рідин вивчений недостатньо і в літературних джерелах не знайдено даних про продукти їх розкладання, що з'являються в процесі росту лідера, існування каналу розряду, генезису парогазової порожнини. В роботах [6, 7] зазначається, що при пробі рідких поліорганосилоксанів утворюється значно більше продуктів розкладання, які знижують пробивну напругу при повторних пробоях, ніж при пробі вуглеводневих рідин. Ці продукти являють собою в основному сполуки кремнію з вуглецем, а згідно з результатами досліджень автора [8] ще і велику кількість газоподібних продуктів: H_2 , CO , C_2H_2 , C_2H_4 . На тлі останнього твердження недостатніми представляються дані про газостійкість ПМС рідини, тобто здатність виділяти або поглинати газ під впливом зовнішніх факторів, особливо електричного поля. Відомо, що як критерій, що зумовлює схильність діелектричної рідини до розкладання під дією високоградієнтних електричних полів, прийнятий саме показник газостійкості. Можливо, ПМС рідина під впливом електричних розрядів і супутніх їм явищ поводить як газовиділяюча, а, як відомо, робота висковольтних імпульсних конденсаторів зазвичай пов'язана з виникненням як мінімум початкових часткових розрядів. Загальне зниження короточасної електричної міцності ПМС рідини в результаті термостаріння може бути пояснено тим, що якщо на початку досліджень зразки рідини були підготовлені (дегазовані) шляхом термовакuumного сушіння протягом 48 годин, то в ході експерименту в процесі термостимульованого старіння вимірювання $E_{пр}$ рідина контактувала з повітрям, що могло призвести до появи в ній газових включень, які створюють сприятливі умови для про-

бою рідини за «електричним» механізмом. За умов правомірності гіпотези про низьку газостійкість органосилоксанових рідин можна зробити припущення про різко негативний вплив факту появи газоподібних включень в ПМС рідині на її короточасну електричну міцність. Це є можливим поясненням відмови від використання ПМС рідини в якості просочуючого діелектрика ізоляції високовольтних імпульсних конденсаторів провідними виробниками та їх титанічні зусилля зі створення нових газостійких зразків просочуючих рідин. Безсумнівно, це питання представляє великий науковий інтерес і потребує подальших досліджень.

Висновки. Таким чином, для імпульсних високовольтних конденсаторів, де електроізоляційні рідини працюють при дуже великій напруженості електричного поля, в випадку використання ПМС рідини як просочуючого діелектрика, необхідно обмежувати напруженість електричного поля в конкретній просоченій діелектричній системі шляхом визначення напруги виникнення початкових часткових розрядів, а також враховувати ступінь поглинання створених частковими розрядами газів і опірність рідини до їх виділення.

Список літератури: 1. Кучинский Г.С. Силовые электрические конденсаторы / Г.С. Кучинский, Н.И. Назаров. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 320 с. 2. Гребенников И.Ю. Исследование зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком от режимов эксплуатации / И.Ю. Гребенников, В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, И.Г. Михайлов, Л.И. Онищенко,

Т.А. Фецуц // Электротехника. – 2006. – №6. – С. 36–41. 3. Borsi H. Dielectric behaviour of silicone and ester fluids for use in distribution transformers / H. Borsi // IEEE Trans. Electr. Insul. – 1991. – Vol. 26, № 4. – P. 755–762. 4. Andreev A.M. Degradation of the impregnated polypropylene insulation of power capacitors under operating conditions / A.M. Andreev, N.M. Zhuravleva, M. Yevtich // Electrical Technology Russia. – 2002. – № 3. – P. 96–106. 5. Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков / И. Адамчевский. – Л.: Энергия, 1972. – 295 с. 6. Андрианов К.А. Синтетические жидкие диэлектрики / К.А. Андрианов, В.В. Скипитеров. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 2002. – 176 с. 7. Бальгин И.Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков / И.Е. Бальгин. – М.-Л.: Энергия, 2004. – 228 с. 8. Малошевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии / П.П. Малошевский. – К.: Наукова думка, 1983. – 272 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kuchinskii, G.S. Silovye elektricheskie kondensatory. G.S. Kuchinskii, N.I. Nazarov. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 320. Print. 2. Grebennikov I.Yu. Issledovanie zavisimosti resursa vysokovol'tnyh impul'snyh kondensatorov s plenochnym dielektrikom ot rejimov ekspluatatsii. I.Yu. Grebennikov, V.I. Gun'ko, A.Ya. Dmitrishin, I.G. Mihailov, L.I. Onischenko, T.A. Feschuk. Elektrotehnika. 2006. No 6. 36–41 Print. 3. Borsi H. Dielectric behaviour of silicone and ester fluids for use in distribution transformers. IEEE Trans. Electr. Insul. 1991. Vol. 26, 4. 755–762. Print. 4. Andreev A.M. Degradation of the impregnated polypropylene insulation of power capacitors under operating conditions. A.M. Andreev, N.M. Zhuravleva, M. Yevtich. Electrical Technology Russia. 2002. No 3. 96–106. Print. 5. Adamchevskii I. Elektricheskaya provodimost' jidkih dielektrikov. I. Adamchevskii. Leningrad: Energiya, 1972. 295 Print. 6. Andrianov K.A. Sinteticheskie jidkie dielektriki. K.A. Andrianov, V.V. Skipiterov. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo, 1962. 176. Print. 7. Balygin I.E. Elektricheskaya prochnost' jidkih dielektrikov. I.E. Balygin. Moscow-Leningrad: Energiya, 1964. 228. Print. 8. Malyushevskii P.P. Osnovy razryadno-impul'snoi tehnologii. P.P. Malyushevskii. Kyiv: Naukova dumka, 1983. 272. Print.

Поступила (received) 25.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Малюшевська Антоніна Павлівна – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник ІПТ НАН України, м. Миколаїв; тел.: (051) 258-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Malyushevska Antonina Pavlivna – Candidate of of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, senior staff scientist of IPPT NAS of Ukraine, Nikolaev; tel.: (051) 258-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Топоров Сергій Олегович – провідний інженер, ІПТ НАН України, м. Миколаїв; тел.: (051) 258-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

Toporov Sergiy Olegovich – senior engineer, IPPT NAS of Ukraine, Nikolaev; tel.: (051) 258-71-36; e-mail: dphc@iippt.com.ua.

УДК 621.317.3

Ю. С. НЕМЧЕНКО, В. В. КНЯЗЕВ, И. П. ЛЕСНОЙ, С. Б. СОМХИЕВ**ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ БАО НА ВОСПРИИМЧИВОСТЬ К ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ, ВЫЗВАННЫХ МОЛНИЕЙ («МНОГОКРАТНЫЕ УДАРЫ» ФОРМЫ 5А) ИГЛА-МКУ-5А**

Описана конструкция и результаты аттестации генератора, предназначенного для испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией «многократные удары» формы 5А, в соответствии с требованиями международных стандартов. Генератор производит циклограммы импульсов тока формы 5А по 5-ти уровням испытаний. Каждая циклограмма состоит из испытательных пакетов импульсов от 1 до 999, а в каждом испытательном пакете – 14 испытательных импульсов.

Ключевые слова: испытание, бортовое оборудование, невосприимчивость, молния, переходные процессы, генератор, аттестация.

Введение. Начиная с 60-х годов прошлого столетия в мире резко увеличились научно-исследовательские работы как по физике молниевых разрядов, так и его взаимодействию с различного рода техническими средствами (ТС). В первую очередь такими ТС являлись авиация и ракетно-космическая техника. Это вызвано тем, что эти ТС наиболее часто попадают в область грозовой деятельности, а иногда даже могут инициировать образование молниевых разрядов. Эти работы были значительно интенсифицированы в 80-е годы прошлого столетия, т.к. в этих ТС на смену малочувствительным электромеханическим и электронным устройствам пришли микроэлектронные устройства (МЭУ). Эти МЭУ ввиду своей слабости оказались чрезвычайно чувствительны к электромагнитным помехам (ЭМП) и, в первую очередь, к ЭМП прямых и косвенных молниевых разрядов (МР).

Полный МР в литературе называется «вспышкой», которая может состоять как из одиночного удара, так и многократных ударов (МКУ). МКУ – это несколько отдельных мощных импульсов тока в течение одной вспышки, временной интервал между которыми может достигать десятков миллисекунд. Наиболее часто МКУ состоит из 3–4 разрядов, хотя фиксировались МКУ, состоящие из 14 и более отдельных разрядов [1–3].

Виды и амплитудно-временные параметры ЭМП МР чрезвычайно разносторонни, но все же удалось их систематизировать в несколько типичных видов, которые и были заложены в нормативные документы по молниестойкости. В 1988 году в СССР был выпущен и действовал до 2004 года стандарт ОСТ 1 01160-88 [4], который предполагал упрощенные испытания на молниестойкость всего лишь тремя видами испытательных напряжений. Для этой цели в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» (ИЛ) использовался генератор ИГЛА-УИМ. В результате дальнейших работ по совершенствованию методик испытаний и максимального приближения их к реальным эффектам, этот стандарт был заменен на стандарт США. Это связано с тем, что требования по молниестойкости наиболее полно и обосновано были изложены в стандартах США, в частности, в стандарте на молниестойкость бортового авиационного оборудования (БАО) – RTCA-DO-160. До настоящего времени в результате нескольких доработок этот стандарт модифицировал

ся от RTCA-DO-160A до RTCA-DO-160G [5].

С 2004 года стандарт версии RTCA-DO-160D был принят в Украине и странах СНГ, как единственно легитимный нормативный документ по испытаниям БАО на электромагнитную совместимость и молниестойкость, который получил название КТ-ВВФ/DO-160D [6]. В этом стандарте раздел 23 посвящен прямому удару молнии в самолет, а раздел 22 – косвенным электромагнитным эффектам МР.

В данной статье сделан упор на испытания БАО по разделу 22, который называется «Восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией». Эти процессы возникают при прямом или косвенном ударе молнии, вызывающих растекание токов молнии по различным металлическим узлам самолетов, в частности, по межблочным линиям связи (МЛС).

Высокая поражающая эффективность токов растекания объясняется тем, что при этом в МЛС возникают различного вида наведенные высокие импульсные напряжения (до нескольких киловольт) и большие токи (до нескольких килоампер), представляющие собой серьезную угрозу для современной слабосточной электроники БАО.

В данном стандарте в отличие от предыдущего значительно расширены виды испытаний и формы испытательных импульсов. Так, вместо трех форм ранее применяемых импульсов испытательного напряжения применяются уже 5 форм, из которых 3 формы испытательного напряжения (формы 2, 3 и 4) и 2 формы испытательного тока (формы 1 и 5А). В дополнение к единичным ударам, которые только и были в предыдущем стандарте, появились новые виды испытаний: «контактный ввод», «кабельный ввод многократными ударами» и «кабельный ввод многократной вспышкой».

Для реализации полного пакета испытаний по разделу 22 в ИЛ уже используется 10 генераторов типа ИГЛА различных модификаций.

В данной статье мы рассмотрим испытания БАО на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией, испытательными токами формы 5А вида «многократные удары» с амплитудно-временными параметрами по таблице 22.4 и рисунку 22.6 [6]. Реализуются эти испытания методом «ввода в заземление» с помощью генератора ИГЛА-МКУ-5А. Этот метод используется для проверки способности само-

летного оборудования выдерживать внутренние электромагнитные эффекты, создаваемые внешним воздействием молний без функциональных отказов и повреждений.

Описание генератора ИГЛА-МКУ-5А. Идеологически схема формирования импульсов тока и напряжения формы 5А приведена в [7].

Генератор ИГЛА-МКУ-5А генерирует испытательные импульсы тока формы «5А» обеих полярностей по пяти уровням испытаний. В табл. 1 (аналог таблицы 22.4 [6]) приведены требования к форме и АВП испытательных импульсов тока и напряжения, которые с учетом допусков в полном объеме реализованы в генераторе ИГЛА-МКУ-5А.

Таблица 1 – Требования к форме и АВП испытательных импульсов тока и напряжения

Параметр	Напряжение $U_{пред}^{5A}$	Ток $I_{исп}^{5A}$ (ф.5А)
1. Испытательный комплект № 5А	Форма не нормирована	
2. Уровни испытаний:		
– 1 (первый удар)	$\leq (20 + 4) В$	(60 + 12) А
– 1 (последующие удары)	$\leq (10 + 5) В$	(30 + 15) А
– 2 (первый удар)	$\leq (50 + 10) В$	(160 + 32) А
– 2 (последующие удары)	$\leq (25 + 12,5) В$	(80 + 40) А
– 3 (первый удар)	$\leq (120 + 24) В$	(400 + 80) А
– 3 (последующие удары)	$\leq (60 + 30) В$	(200 + 100) А
– 4 (первый удар)	$\leq (300 + 60) В$	(800 + 160) А
– 4 (последующие удары)	$\leq (150 + 75) В$	(400 + 200) А
– 5 (первый удар)	$\leq (640 + 128) В$	(2000 + 400) А
– 5 (последующие удары)	$\leq (320 + 160) В$	(1000 + 500) А
3. Длительность фронта, T_n , мкс	не нормировано	40 ± 8
4. Длительность полуспада, $T_{0,5}$, мкс	не нормировано	120 ± 24

На рис. 1 (аналог рисунка 22.7 [6]) приведен пакет вида «многократные удары». Основное требование стандарта, чтобы один первый импульс сопровождается тринадцатью последующими импульсами, распределенными в интервале до 1,5 секунд.

Генератор ИГЛА-МКУ-5А представляет собой высоковольтную электроразрядную установку с программируемым таймером-коммутатором, которая генерирует многократные испытательные импульсы тока и напряжения положительной и отрицательной полярности по пяти уровням испытаний. Общий вид генератора ИГЛА-МКУ-5А приведен на рис. 2, а передняя панель генератора – на рис. 3.

Временные параметры пакета импульсов генератора ИГЛА-МКУ-5А:

- количество испытательных импульсов в испытательном пакете – 14;
- интервал между испытательными импульсами в испытательном пакете от 10 мс до 200 мс;
- длительность испытательного пакета до 1,5 с;
- количество испытательных пакетов от 1 до 999.

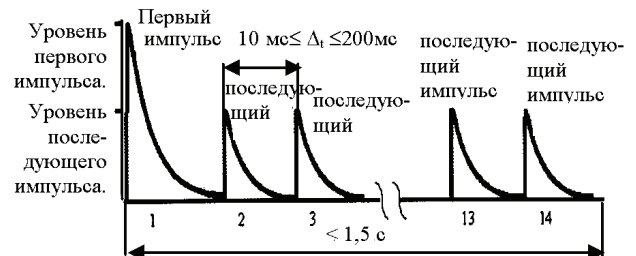


Рисунок 1 – Пакет испытательных токов вида «многократные удары» формы 5А



Рисунок 2 – Общий вид генератора ИГЛА-МКУ-5А



Рисунок 3 – Передняя панель генератора ИГЛА-МКУ-5А

Генератор ИГЛА-МКУ-5А собран в металлическом корпусе с габаритами 480 x 215 x 450 мм. На передней панели генератора ИГЛА-МКУ-5А (рис. 3) расположены следующие органы управления и контроля:

- клавиша СЕТЬ с подсветкой служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор ИГЛА-МКУ-5А и для его отключения после окончания работы;
- переключатель ИСПЫТ. УРОВЕНЬ служит для установления уровня испытательного тока генератора ИГЛА-МКУ-5А и имеет пять положений: «1», «2», «3», «4», «5»;
- переключатель ПОЛЯРНОСТЬ служит для установления полярности выходного тока (положительной или отрицательной);
- переключатель ИНТЕРВАЛ, СЕК служит для

установления временных интервалов в циклограмме между испытательными пакетами и имеет пять положений: «однократный», «10», «20», «40», «60»;

– табло КОЛИЧЕСТВО УДАРОВ служит для установления количества испытательных пакетов в заданной циклограмме многократных ударов;

– кнопка СТАРТ служит для запуска генератора ИГЛА-МКУ-5А;

– кнопка УСТАН. для установления количества испытательных пакетов (для уменьшения этого количества - пользоваться кнопкой СБРОС);

– кнопка СБРОС служит для остановки генератора ИГЛА-МКУ-5А и сброса ранее установленного количества испытательных пакетов до нуля;

– светодиод ИНД. ИМП служит для фиксации каждого импульса в испытательном пакете.

На задней панели генератора ИГЛА-МКУ-5А расположены следующие органы управления и контроля:

– клемма \perp служит для подключения генератора ИГЛА-МКУ-5А к контуру заземления;

– разъем СЕТЬ (~ 220 В) служит для подключения к генератору ИГЛА-МКУ-5А сетевого кабеля;

– «6А» – предохранители;

– разъем ВЫХОД служит для подключения к генератору выходного кабеля и далее к испытуемому изделию;

– регулятор РЕГУЛИРОВКА Узар «меньше» – «больше» служит для установки номинального значения Узар в зависимости от напряжения в сети электропитания.

Блок-схема генератора ИГЛА-МКУ-5А приведена на рис. 4.

Основным блоком генератора ИГЛА-МКУ-5А является блок формирования циклограммы (БФЦ). Циклограмма испытательных импульсов многократного удара представляет собой:

– испытательный пакет по рис. 1, содержащий 14 отдельных импульсов, следующих друг за другом с частотой 10 Гц (формируется блоком формирования цикла многократного удара (БФП)). БФП представляет собой электронную схему, состоящую из задающего генератора частотой 10 Гц, нагруженного на цифровые микросхемы, устанавливающие пачку из 14 импульсов;

– испытательные пакеты следуют друг за другом со временем между импульсами 10 с;

– 20 с; 40 с; 60 с (формируется блоком формирования временных интервалов (БФИ)). БФИ представляет собой электронную схему, которая вырабатывает интервалы 10 с; 20 с; 40 с; 60 с, по завершению которых запускается блок БФП;

– общее количество испытательных пакетов устанавливается программой испытаний (но не менее 10 каждой полярности) (формируется блоком управления и счетчика импульсов (БУС)). БУС представляет собой стандартный счетчик СТ10, который в соответствии с установленным на нем количеством испытательных пакетов, запускает БФИ.

Расположение элементов внутри корпуса генератора ИГЛА-МКУ-5А приведено на рис. 5.

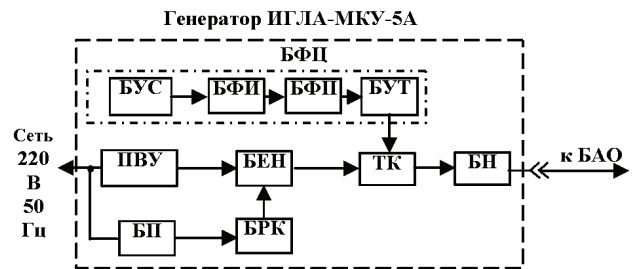


Рисунок 4 – Блок-схема генератора ИГЛА-МКУ-5А:
БФЦ – блок формирования циклограммы испытательного импульса; БУС – блок управления и счетчик импульсов;
БФИ – блок формирования временных интервалов;
БФП – блок формирования цикла многократного удара;
БУТ – блок управления тиристором;
ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство;
БЕН – блок емкостных накопителей;
ТК – управляемый тиристорный коммутатор; БН – блок нагрузок; БРК – блок разряда накопительного конденсатора;
БАО – бортовое авиационное оборудование;
БП – блок питания БРК

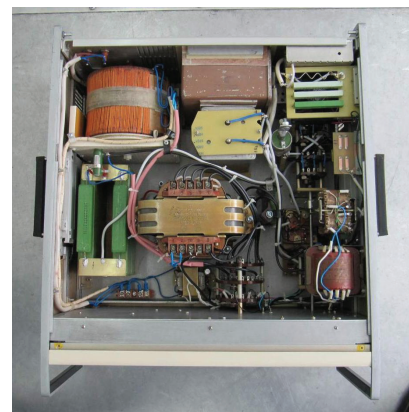


Рисунок 5 – Расположение элементов внутри корпуса генератора ИГЛА-МКУ-5А

Результаты аттестации генератора. На рис. 6 приведены осциллограммы выходных импульсов тока первого и последующего ударов формы «5А» положительной полярности для 5 уровня испытаний.

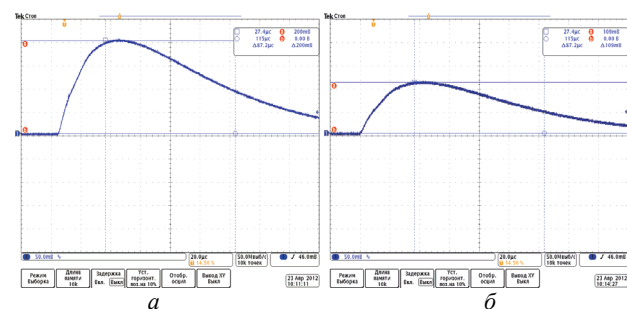


Рис. 6 – Типовые осциллограммы выходных импульсов тока первого и последующего ударов формы «5А» (5 испытательный уровень положительной полярности):
а – первый удар – 2кА (со 2 по 14 удар) – 1кА; б – последующие удары

На рис. 7 приведена осциллограмма испытательного пакета тока формы 5А вида «многократные удары» из 14 ударов общей длительностью 1,32 с.

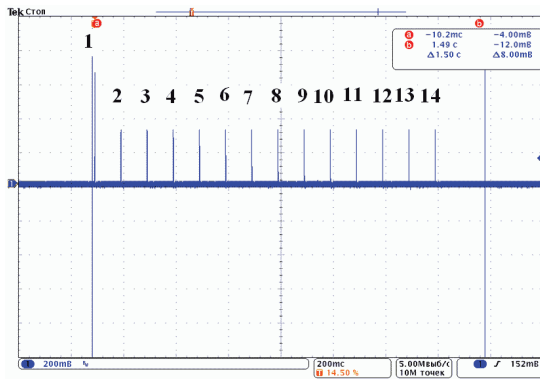


Рис. 7 – Осциллограмма испытательного пакета вида «многогоразовые удары» формы 5А из 14 ударов общей длительностью 1,32 с

Схема испытаний БАО с МЛС приведена на рис. 8.

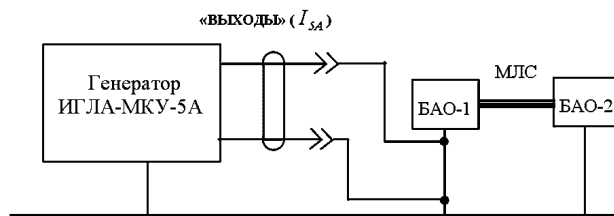


Рисунок 8 – Схема испытаний БАО: ИГЛА-МКУ-5А – испытательный генератор; МЛС – межблочная линия связи; БАО-1, БАО-2 – испытываемое оборудование

Выводы. Генератор ИГЛА-МКУ-5А успешно прошел первичную аттестацию с участием представителей ГП «Харьковстандартметрология» по разработанной в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» соответствующей программе и методике аттестации. Генератор

ИГЛА-МКУ-5А введен эксплуатацию в ИЛ НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» и участвует в испытаниях БАО на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией методом «многократные удары» испытательными токами формы 5А.

Список литературы: 1. Юман М. Естественная и искусственно инициированная молния и стандарты на молниезащиту / ТИИЭР. – 1988. – Т.76, № 12. – С. 5–26. 2. IEC 62305-1:2010 (Ed.2) Protection against Lightning – Part 1: General principles. 3. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications. 4. DO-160G:2011 Environmental conditions and test procedures for airborne equipment, Part 22, Lightning induced transient susceptibility. 5. ОСТ 1 01160-88 Оборудование бортового самолетов и вертолетов. Методы испытаний на молниестойкость. 6. КТ-ВВФ / DO-160D/ED-14D / Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 22.0 Восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией. 7. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («многократные удары») формы 5А ИГЛА-МКУ-5А. Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-5.000.000.000 РЭ.

Bibliography (transliterated): 1. Juman M. Estestvennaja i iskusstvenno iniciirovannaja molnija i standarty na molniezashhitu. TIIEr. - 1988. Vn.76. No 12. 5–26 Print. 2. IEC 62305-1:2010 (Ed.2) Protection against Lightning – Part 1: General principles Print. 3. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications Print. 4. DO-160G:2011 Environmental conditions and test procedures for airborne equipment, Part 22, Lightning induced transient susceptibility Print. 5. OST 1 01160-88 Oborudovanie bortovoe samoletov i vertoletov. Metody ispytaniy na molniestojkost' Print. 6. KT-VVF / DO-160D/ED-14D / Uslovija jekspluatacii i okružhajushhej sredy dlja bortovogo aviacionnogo oborudovanija. (Vneshnie vozdejstvujushhie faktory – VVF). Trebovanija, normy i metody ispytaniy. Razdel 22.0 Vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej Print. 7. Generator dlja provedenija ispytaniy bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («mnogokratnye udary») formy 5A IGLA-MKU-5A. Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-MKU-5.000.000.000 RJe Print.

Поступила (received) 22.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Немченко Юрий Семенович – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», главный метролог, тел.: (057) 707-68-68. e-mail: knyaz2@i.ua.

Netchenko Jurij Semenovich – Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", Main Metrologist, tel. (057) 707-68-68. e-mail: knyaz2@i.ua.

Князев Владимир Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», ведущий научный сотрудник, тел.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua.

Knyaziev Vladimir Vladimirovich –Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Staff Scientist, Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", Principal Scientist, tel.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua.

Лесной Иван Петрович – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», заведующий лабораторией, тел.: (057) 707-68-68. e-mail: lesnoy@i.ua

Lesnoy Ivan Petrovich – Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", Manager by a Laboratory, tel.: (057) 707-68-68. e-mail: lesnoy@i.ua

Сомхив Сергей Борисович – Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», ведущий инженер, тел.: (057) 707-68-68. e-mail: knyaz2@i.ua.

Somhiev Sergej Borisovich – Reserch and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", Leading Engineer, tel.: (057) 707-68-68. e-mail: knyaz2@i.ua.

УДК 004.056

В. Я. ПЕВНЕВ**МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ИНФОРМАЦИИ
В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Обоснована проблема целостности информации как наиболее уязвимого звена в обеспечении информационной безопасности. Рассмотрены угрозы целостности на различных этапах жизненного цикла информации. Представлены основные методы обеспечения целостности информации. В каждом из рассмотренных методов выделены основные угрозы и пути их решения. Комплексное использование рассмотренных организационных, технических, программных решений позволяет обеспечить целостность информации как основополагающей составляющей информационной безопасности систем.

Ключевые слова: целостность информации, угрозы, жизненный цикл, методы обеспечения, информационная безопасность.

Введение. Обеспечение информационной безопасности (ИБ) при использовании информационных и коммуникационных систем предполагает решение проблем обеспечения целостности, доступности и конфиденциальности [1], хотя в последних публикациях [2] и европейских стандартах [3] к этим трем китам добавляются аутентичность, подотчетность, безотказность и надежность. В большинстве систем, включая системы в которых циркулирует информация с ограниченным доступом, наиболее острой проблемой является проблема обеспечения целостности информации (ЦИ). Под целостностью понимается свойство информации быть защищенной от несанкционированного искажения, разрушения или уничтожения [4].

Следует отметить, что ни доступности, а тем более конфиденциальности, без обеспечения ЦИ достичь невозможно. Например, исходя из современных требований к криптосистемам, незначительное изменение исходного текста должно приводить к значительному изменению зашифрованной последовательности. Если в процессе передачи исказится один бит передаваемой шифрограммы, то после расшифровки полученный текст будет сильно отличаться от исходного. Таким образом, можно говорить о проблеме обеспечения ЦИ, которая не решена в полной мере на сегодняшний день.

Анализ литературы. В настоящее время большинство исследователей в области ИБ занимаются криптологией. Достаточно много работ посвящено цифровой подписи. Среди них можно выделить монографию [2]. Есть отдельные работы, в которых рассматриваются вопросы обеспечения ЦИ, но они в подавляющем большинстве рассматривают вопросы целостности в базах данных [5,6] или компьютерных сетях [7]. Работ, в которых комплексно рассматриваются методы обеспечения ЦИ, автору найти не удалось.

Цель статьи – проанализировать возможные угрозы, возникающие в течение жизненного цикла информации, и рассмотреть методы обеспечения ЦИ.

Угрозы ЦИ. Исходя из определения ЦИ, можно выделить следующие воздействия на информацию [8]:

- модификацию информации;
- подмену информации;
- уничтожение информации.

Модификация предполагает изменения какой-либо части информации. Эти изменения может быть как случайным, так и преднамеренным. Во втором случае они могут быть санкционированными либо несанкционированными.

Подмена предполагает навязывание ложной информации путем замены истинной (первоначальной) информации. Уничтожение чаще всего связывается с уничтожением физического носителя информации и/или размагничиванием (форматированием) электронных носителей.

Рассмотрим возможные угрозы ЦИ в течение ее жизненного цикла.

При использовании неполных и/или ложных данных во время создания (появления) информации можно получить не соответствующую действительности информацию о тех или иных событиях. Адекватность принятого решения, основанного на такой информации, вызывает сомнения.

При обработке информации нарушение ЦИ может возникнуть вследствие технических неисправностей, алгоритмических и программных ошибок, ошибок и деструктивных действий обслуживающего персонала, внешнего вмешательства, действия разрушающих и вредоносных программ (вирусов, эксплойтов, червей, логических бомб).

В процессе передачи на информации могут воздействовать различного рода помехи как естественного, так и искусственного происхождения. При этом возможно ее искажение или стирание (уничтожение). Кроме этого, возможен перехват информации с целью ее модификации и дальнейшего навязывания.

В процессе хранения основными угрозами являются несанкционированный доступ с целью модификации (вплоть до уничтожения) информации, вредоносные программы (вирусы, трояны, черви, логические бомбы) и технические неисправности.

В процессе старения основными угрозами информации, наряду с угрозами при хранении, можно считать утерю технологий, способных воспроизвести ту или иную информацию, и физическое старение носителей информации.

Следует отметить, что на всех этапах жизненного цикла существует угроза ЦИ из-за используемых технических систем. Это банальные неисправности, сбои электропитания, электромагнитные импульсы и т.д.

При утилизации об обеспечении ЦИ речи не

идет.

Таким образом, можно сделать вывод, о том что, угрозы ЦИ возникают на протяжении всего жизненного цикла информации с момента ее появления до начала утилизации.

Надежность технических средств. Необходимым условием обеспечения ЦИ является наличие высоконадежных технических средств (ТС), которые включают в себя как аппаратную, так и/или программную составляющие [9]. Такое оборудование должно обеспечивать как высокую отказоустойчивость, так и защиту информации от возможных угроз.

Одним из самых распространенных способов повышения надежности ТС является резервирование. Если рассматривать ТС с точки зрения информационной составляющей, то повышение надежности достигается за счет последовательного соединения элементов системы, отвечающих за данную составляющую. Если последовательно соединить два компьютера, поставив на каждый из них свой антивирус, то вероятность проникновения вредоносной программы уменьшается. Однако при этом уменьшается вероятность безотказной работы ТС, состоящей из двух компьютеров.

Для обеспечения заданной надежности (гарантоспособности) такого информационно-технического комплекса необходимо применять последовательное соединение резервированных частей ТС.

ТС предполагают и возможность использования выделенных и/или физически защищенных линии связи, например бронированные кабели с контролем целостности оболочки.

К ТС обеспечения ЦИ следует отнести и средства защиты от электромагнитного импульса (ЭМИ). Поражающими факторами ЭМИ являются высокоинтенсивные электромагнитные поля, которые либо непосредственно воздействуют на радиоэлектронные средства (РЭС), либо трансформируются в опасных трактах этих средств в наведенные токи и напряжения [10]. Наиболее эффективным методом уменьшения интенсивности ЭМИ является экранирование – размещение оборудования в электропроводящем корпусе, который препятствует проникновению электромагнитного поля от источника к защищаемому оборудованию. Однако, в большинстве случаев, защищаемое оборудование имеет внешние коммуникации, что приводит к проникновению в экранированное пространство наведенных помеховых токов и напряжения, вызывающих повреждение элементной базы РЭС. Решением являются методы ограничения наведенных напряжений и токов по амплитуде и спектру во внешних трактах РЭС и электромагнитная развязка внешних цепей РЭС от экранированных устройств. Для ограничения наводок по амплитуде и спектру используются искровые и газоразрядные разрядники, полупроводниковые ограничительные приборы, варисторы и специальные нелинейные сопротивления. К ограничителям спектра относятся проходные конденсаторы, дроссели и фильтры [10].

Электромагнитная развязка достигается с помощью изолирующих трансформаторов, дросселей, оп-

тронов, элементы оптоэлектроники. Применение оптоэлектронных схем позволяет уменьшить число замкнутых контуров и обеспечить электрическую развязку цепей. Кроме этого системы на базе оптоэлектроники являются нечувствительными к воздействию помеховых электромагнитных полей вследствие того, что носителями информации в этих системах являются электрически нейтральные фотоны. Еще одним преимуществом оптоэлектронных систем является ограничение полосы пропускания, особенно на высоких частотах, и тем самым являются беспроводными ограничителями высокочастотных помеховых наводок на входные цепи РЭС, которые свойственны ЭМИ [10].

Разграничение доступа. Широко распространенным и достаточно эффективным методом обеспечения ЦИ является организация доступа к информации и используемому оборудованию. Данный метод относится к организационным и предполагает достаточно большой перечень мероприятий, начиная от подбора сотрудников и заканчивая работой с техникой и документами [11].

Среди них можно выделить технологии защиты, обработки и хранения документов, аттестацию помещений и рабочих зон, порядок защиты информации от случайных и/или несанкционированных действий персонал и т.д. Для обеспечения ЦИ в ИКС особое внимание следует уделить защите операционных систем (ОС), обеспечивающих функционирование практически всех составляющих системы. Наиболее действенным механизмом разграничения доступа для ОС является изолированная программная среда (ИПС) [12]. ИПС повышает устойчивость ИКС к различным разрушающим и вредоносным программам, позволяя обеспечить целостность информации.

Антивирусная защита. Одной из угроз ИБ являются вредоносные программы, в которых отдельным классом выделяются вирусы. Их множество видов и типов, они отличаются между собой способами воздействия на различные файлы, размещением в памяти ЭВМ или программах, объектами воздействия. Но главное свойство вирусов – способность к размножению. Это свойство выделяет их среди множества вредоносных программ и делает наиболее опасными.

Одним из самых действенных способов обеспечения ЦИ является хорошо продуманная и надежная защита от вирусов. Наиболее распространенным способом защиты от вирусов является использование антивирусных программ, которых в настоящее время достаточно количество. Однако необходимо помнить, что ни одна программа не гарантирует обнаружение неизвестного вируса.

Применяемые эвристические сканеры, которые теоретически могут обнаружить неизвестные вирусы по косвенным признакам, не всегда дают правильный диагноз. Примером подобных ошибок могут служить два антивирусные программы, запущенные на одном компьютере. Практически любой пользователь сталкивался с ситуацией, когда файлы одного антивируса принимались за вредоносную программу другим антивирусом.

Самым лучшим способом защиты от вирусов является использование локальных сетей, которые не имеют связи с интернетом. При этом необходимо жестко контролировать различные носители информации с прикладными программами, с помощью которых можно занести вирус.

Помехоустойчивое кодирование. Наиболее уязвимой информация бывает в процессе ее передачи. Это можно пояснить тем, что такая мера обеспечения ЦИ, как разграничение доступа снимает многие угрозы, но она невозможна при использовании в канале связи беспроводных линий. Информация наиболее уязвима именно на таких участках ИКС. Очевидно, что при преднамеренном воздействии на передаваемый сигнал обеспечить ЦИ невозможно. Для исправления ошибок при передаче, возникших в результате природных явлений, технических сбоев, используется помехоустойчивое кодирование (ПКИ).

Изучение ПКИ началось практически сразу после выхода в свет работы [13]. Наиболее известными в нашей стране являются работы [14-16]. В этих работах представлены и проанализированы различные методы ПКИ. Главной идеей исправления ошибок, возникающих в процессе передачи, является введение избыточности в передаваемое сообщение. Чем больше необходимо исправить ошибок, тем больше должна быть избыточность.

В настоящее время все большую популярность завоевывает «мягкое» декодирование, основанное на совместном конструировании кода и множества сигнальных точек. Такая сигнально кодовая конструкция обеспечивает более высокую эффективность и больший энергетический выигрыш от кодирования, чем последовательное применение ПКИ и модуляции [16].

В работах [17,18] предложен и обоснован метод обеспечения ЦИ в системах передачи информации, основанный на контроле четности в миниблоках и контрольной сумме. Данный метод наиболее эффективен при работе с кратными ошибками, обладает высокой скоростью восстановления информации.

Сжатие данных. Как известно [19], сжатие подразумевает замену последовательности символов другой последовательностью меньшей длины либо оптимальное кодирование. Обеспечение ЦИ достигается за счет уменьшения объема передаваемой информации. Это уменьшение можно достичь за счет оптимального кодирования источника. Однако такой метод в настоящее время практически не используется ввиду того, что при цифровой обработке сигнала выгоднее, с точки зрения организации вычислительного процесса, под каждый символ выделять одинаковое количество бит.

Наиболее часто используется метод динамического сжатия. При таком подходе структура сжатого сообщения включает в себя словарь и сжатую информацию. Уменьшение объема передаваемой информации достигает 20 раз (в зависимости от типа передаваемой информации). Однако, если при передаче или хранении возникает ошибка, особенно в словаре, то возникает эффект размножения ошибок, приводящий

к значительному искажению либо уничтожению информации.

В работах [20, 21] представлен способ сжатия информации, позволяющий уменьшить размер файлов небольшой длины (менее 1000 бит) до 75 процентов. Основная идея данного способа – использование шести бит для кодирования передаваемого символа и нескольких кодовых таблиц, предварительно размещенных у пользователей ИКС.

Стеганография. С этим термином знакомы все, кто занимается криптографией. В настоящее время можно выделить три тесно связанных между собой направления стеганографии: сокрытие данных, цифровые водяные знаки и заголовки. При скрытой передаче информации одновременно с обеспечением конфиденциальности [13] решается и вопрос обеспечения ЦИ. Нельзя изменить того, чего не видишь - главный аргумент использования стеганографии для обеспечения ЦИ.

Одним из самых простых способов скрытой передачи является отправление сообщения внутри другого сообщения. Это может быть какой-то контейнер, например, в группированном рисунке на втором плане находится текстовое сообщение написанное белым по белому. К этому методу можно отнести и использование специальных сигналов, например широкополосных шумоподобных либо ортогональных.

Главным недостатком использования стеганографии для обеспечения ЦИ является значительно больший объем контейнера по сравнению с объемом сообщения. Но этот недостаток можно нивелировать, передавая в качестве контейнера полезную информацию, не критичную к ЦИ.

Об использовании методов стеганографии с целью обеспечения ЦИ не принято говорить, хотя они являются наиболее эффективными для решения поставленной задачи.

Резервирование. Данный метод обеспечения ЦИ используется в основном при передаче и хранении информации.

При передаче возможен многократный повтор сообщения в одно направление либо рассылка сообщений во все возможные направления. Данный подход можно рассматривать как один из методов ПКИ.

При хранении идея резервирования достаточно проста – создание копий полученных файлов и их хранение отдельно от первоначальных документов. Зачастую такие хранилища создаются в географически разнесенных местах. В качестве примера можно рассмотреть современные облачные технологии.

Одним из главных недостатков резервирования информации является повышение возможности ее несанкционированного снятия, т.к. информация, расположенная на внешних устройствах хранения, является незащищенной.

Выводы. В представленной работе рассмотрены возможные методы обеспечения ЦИ в ИКС. Это обеспечение надежности ТС, разграничение доступа, стеганография (скрытие факта передачи), помехоустойчивое кодирование, антивирусная защита, сжатие

данных, резервирование.

В каждом из рассмотренных методов выделены наиболее существенные угрозы ЦИ и показаны возможные пути их устранения. Практическая реализация этих методов зависит от угроз, которые возникают в процессе жизненного цикла информации, и вида используемой информации.

Следует отметить, что ни один из рассмотренных методов обеспечения ЦИ не позволяет решить рассмотренную проблему. Обеспечение ЦИ можно достичь только комплексным использованием рассмотренных методов. Это единственный подход, позволяющий обеспечить гарантоспособность инфокоммуникационных систем.

В работе не рассмотрены контрольная сумма, цифровая подпись и криптографические методы, которые позволяют контролировать ЦИ, осуществлять организацию парольного доступа, но не могут обеспечить ЦИ.

Список литературы: 1. Закон України «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» від 31.05.2005 №2594-IV. 2. Горбенко І.Д. Інфраструктура відкритих ключів. Електронний цифровий підпис. Теорія та практика: монографія / Ю.І.Горбенко, І.Д.Горбенко. – Х.: Форт, 2010. – 608 с. 3. ISO/IEC 13335-1 : 2004 Information technology – Security techniques – Management of information and communications technology security – Part 1: Concepts and models for information and communications technology security management (IDT) http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=39066. 4. Указ Президента України 27.09.99 N 1229/99 «Про Положення про технічний захист інформації в Україні». <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1229/99>. 5. Джонатан Л. Ядро Oracle. Внутреннее устройство для администраторов и разработчиков данных / Л. Джонатан. М.: ДМК-Пресс, 2015. – 372 с. 6. Хомоненко А.Д. Базы данных / А.Д.Хомоненко, В.М.Цыганков, М.Г.Мальцев. – СПб.: КОРОНА-Век, 2009. – 736 с. 7. Максимов Н.В. Компьютерные сети / Н.В.Максимов, И.И.Попов. – М.: Форум, 2010. – 464 с. 8. Певнев В.Я. Эффективность информационной безопасности замкнутых систем / В.Я. Певнев // Радиоэлектроника и компьютерные системы. – 2009. – № 5. – С. 82-85. 9. ДСТУ 3396.2-97. Захист інформації. Технічний захист інформації. Терміни та визначення. введ.01.01.98. – К.: Держстандарт України, 1997. – 16 с. 10. Кравченко В.И. Оружие на нетрадиционных принципах: Электромагнитное оружие / В.И.Кравченко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 266 с. 11. Цуранов М.В. Методи та засоби боротьби з правопорушеннями в інформаційній сфері: навчальний посібник / М.В.Цуранов, В.М.Струков, В.Я.Певнев. –Х.: ХНУВС, 2015. – 256 с. 12. Проскурин В.Г. Программно-аппаратные средства обеспечения информационной безопасности. Защита в операционных системах: Учеб. пособие для вузов / В.Г.Проскурин, С.В.Крутов, И.В.Мацкевич. – М.: Радио и связь, 2000. – 168 с. 13. Шеннон К.Е. Математическая теория связи / К. Е. Шеннон // Работы по теории информации и кибернетике. – М.: ИЛ, 1963. – 476 с. 14. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон. – М.: Мир, 1976. – 594 с. 15. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь / Р. Галлагер. – М.: Сов. радио, 1974. – 568 с. 16. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса. – М.: Техносфера, 2005. – 320 с. 17. Певнев В.Я. Спосіб відновлення інформації при обміні даними у телекомунікаційних системах / В.Я.Певнев і др. // Д.п. № 26778. Бюл., 2007. – № 16. 18. Певнев В.Я. Теоретичне обґрунтування методу відновлен-

ня повідомлення, прийнятого з помилками / В.Я.Певнев, М.В.Цуранов // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. – Х., ХУПС, 2013. – № 2 (109). – С. 194-196. 19. Смирнов М. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолін, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: Диалог-МИФИ, 2002. – С. 384. 20. Певнев В.Я. Про один засіб стиску текстової інформації / В.Я.Певнев, І.Л.Яценко // Вісник ЖІТІ. – Житомир: 2002. – № IV (23). – С. 206-209. 21. Певнев В.Я. Метод восстановления информации при обмене данными в распределенных вычислительных системах / В.Я.Певнев, И.Л.Яценко // Вісник КДПУ. – Кременчуг: 2003. – Вып. 3 (20). – С. 19-21.

Bibliography (transliterated): 1. Zakon Ukraine «Pro zahist informacij v informacijno-teleckomunikacijnih sistemah» vid 31.05.2005 No 2594-IV. Print. 2. Gorbenko I.D. Infrastruktura bidkrutih klyuchiv. Elektronnyu cifrovuyu pidpis. Teorija ta praktika: monografija. U.D.Gorbenko, I.D.Gorbenko. Kharkiv: Form, 2010. 608. Print. 3. ISO/IEC 13335-1 : 2004 Information technology – Security techniques – Management of information and communications technology security – Part 1: Concepts and models for information and communications technology security management (IDT) http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=39066. 4. Ukaz Prezidenta Ukraine 27.09.99 N 1229/99 «Pro polozhennya pro tehničnuyu zachist informacij v Ukraini». <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1229/99>. 5. Dzhonotan L. Yadro Oracle. Vnutrennee ustrojstvo dlya administratorov i razrabotcikov dannuh. L. Dzhonotan. Moscow: DMK-Press, 2015. 372. Print. 6. Homonenko A.D. Bazu dannuh. A.D.Homonenko, B.M.Cugankov, M.G.Mal'cev. Sankt Petersburg: KORONA-Vek, 2009. 736. Print. 7. Maksimov N.V. Comp'uternye seti. N.V.Maksimov, I.I.Popov. Moscow: Forum, 2010. 464. Print. 8. Pevnev V.Ya. Effektivnost informacionnoj bezopasnosti zamknytyh system. V.Ya.Pevnev. Radioelektronika i komp'uterni sistemu. 2009. No 5. 82-85. Print. 9. DSTU 3396.2-97. Zahust informacii. Tehničnuyu zahust informacii. Terminu ta vuznachennya. vvedv.01.01.98. Kyiv: Derzhstandart Ukraine, 1997. 16. Print. 10. Kravchenko V.I. Oruzhie na netradicionnuh principah: Elektromagnitnoe oruzhie. V.I.Kravchenko. Kharkiv: NTU «KhPI», 2009. 266. Print. 11. Curanov M.V. Metodu ta zacjbu borot'bu z pravoporuchinnjamu v infjrmacijnoy sferi: navchal'nyu posibnik. M.V. Cyranov, V.M. Strykov, V.Ya. Pevnev. Kharkiv: KhNUVD, 2015. 256. Print. 12. Proskurin V.G. Programmno-apparatnye sredstva obespecheniya informacionnoj bezopasnosti. Zashchita v operacijnyh sistemah: ucheb. posobiy dlya vyzov. V.G.Proskyrin, S.V.Krutov, I.V.Mackevich. Moscow: Radio i svyaz, 2000. 168. Print. 13. Shennon K. E. Matematicheskaya teoriya svyazi. K.E.Shennon. Rabotu po teorii informacii i kibernetiki. Moscow: IL, 1963. 476. Print. 14. Piterson U. Kodu, ispravlyayushchie oschibki. U. Piterson, E. Ueldon, U. Piterson. Moscow: Mir, 1976. 594. Print. 15. Gallager P. Teoriya informacij i nadeschnaya svyaz. P.Gallager. Moscow: Sov. radio, 1974. 568. Print. 16. Morelos-Saragosa R. Iskustvo pomehoustoychivogo kodirovaniya. Metodu, algoritmu, primenenie. R. Morelos-Saragosa. Moscow: Tehnosfera, 2005. 320. Print. 17. Pevnev V.Ya. Sposib vidnovlennya informacij pri obmini dannymi u telekomunikacijnyh sistemah. V.Ya. Pevnev i dr. D.p. No 26778. Bul., 2007. No 16. Print. 18. Pevnev V.Ya. Teoretuzhchne obgruntuвання методу відновлення повідомлення, прийнятого з помилками. V.Ya. Pevnev, M.V. Curanov. Sistemu obrobku informacij. Zbirnik naukovuh prac. No 2 (109). Kharkiv: KhUPS, 2013. 194-196. Print. 19. Smirnov M. Metodi sjatiya dannih. Ustrojstvo, sjatiya izobrazjeniya i video. D.Vatolin, A.Ratushnyak, M. Smirnov, V.Yukin. Moscow: Dialog-MIFI, 2002. 384. Print. 20. Pevnev V.Ya. Pro odin zasob stisku tekstovoy informacij. V.Ya.Pevnev, I.L.Yacenko. Visnik ZhITI. No IV (23). Zhitomir: 2002. 206-209. Print. 21. Pevnev V.Ya. Metod vosstanovlennya informacij pri obmene dannymi v raspredeleennyh vychickitel'nyh sistemach. V.Ya.Pevnev, I.L.Yacenko. Visnik KDFPU: Vol. 3/2003 (20). Kremenchug: 2003.19-21. Print.

Поступила (received) 09.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Певнев Владимир Яковлевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем и сетей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»; тел.: (050) 40-366-73; email: pevnevvy@mail.ru

Pevnev Vladimir Yakovlevich, Ph.D., associate professor, assistant professor of the Department of Computer Systems and Networks of the National Aerospace University. NE Zhukovsky "HAI"; tel.: (050) 40-366-73; email: pevnevvy@mail.ru

УДК 551.594

А. А. ПЕТКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРАЖЕНИЯ ПЛОСКОСТИ РАЗРЯДОМ ДЛИННОЙ ИСКРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОШАГОВОЙ МОДЕЛИ

Показано, что предложенная модель для диапазона изменения высот ориентировки от 0,78 м до 5 м адекватно описывает распределение точек поражения плоскости длинной искрой. Близкие значения вариативных параметров модели позволяют предложить модель для прогнозирования распределения точек поражения плоскости при больших значениях высоты ориентировки для геометрически подобных разрядных промежутков. Материалы работы могут быть использованы для построения моделей поражения длинной искрой объектов, расположенных на плоской поверхности.

Ключевые слова: математическая модель, функция распределения, случайная величина, разряд длинной искры.

Введение. Развитие электроэнергетических систем характеризуется широким внедрением управляющего электронного и микропроцессорного оборудования, которое в значительной степени подвержено влиянию электромагнитных процессов, возникающих при разряде молнии, являющейся длинной искрой. Одной из составляющих энергосистем являются загубленные оборудование, которое расположено непосредственно под поверхностью грунта (кабели, заземляющие устройства, оборудование складов, вводы коммуникаций и т.п.). Для обеспечения его надежной работы необходимо изучение закономерностей поражения поверхности грунта финальным разрядом молнии.

Анализ предварительных исследований и литературы. В [1] обсуждается современное представление о разряде молнии, рассматриваются эффекты, приводящие к прямому поражению молнией различных объектов. В работе указывается на противоречивость результатов теоретических оценок и лабораторных исследований по проблеме защиты от прямых ударов молнии в различные объекты.

В [2] и дальнейших работах авторов рассмотрен механизм формирования искрового разряда, показано влияние напряженности электрического поля на процесс движения искрового разряда. Предложена электростатическая модель ориентировки молнии, акцентировано внимание на тот факт, что вероятность поражения объектов определяется величиной заряда, наведенного на объекте развивающимся лидером молнии.

Работа [3] посвящена вопросам молниезащиты различных объектов. Рассмотрены различные методики определения защитных свойств молниеотводов.

Рассмотренные работы показывают, что вопросы молниезащиты не имеют законченного рассмотрения и требуют дальнейших разработок по построению моделей поражаемости молнией различных объектов.

Одной из задач такого рода является описание поражения молнией проводящей плоскости. Различные варианты решения данной задачи с тем или иным

приближением рассмотрены в работах [4-6]. Экспериментальные исследования данного вопроса представлены во многих публикациях, например [7-10]. В настоящей работе представлены материалы дальнейших исследований в направлении описания поражения плоскости разрядом длинной искры.

Цель работы. Разработка многошаговой модели поражения плоскости длинной искрой и исследование ее применимости для описания распределения точек поражения длинной искрой бесконечной плоской поверхностью.

Результаты исследований. Предлагается следующая многошаговая модель поражения плоскости Q разрядом длинной искры, графическая интерпретация которой при трех шагах движения показана на рис. 1. Искра начинает движение из точки, расположенной на высоте H (высота ориентировки) над плоскостью Q , в направлении, которое определяется углом движения θ (угол между осью OZ и направлением движения) и углом ориентировки в горизонтальной плоскости α (угол между осью OX и конечной точкой движения на данном шаге). Углы определяются в локальной системе координат, относящейся к рассматриваемому шагу.

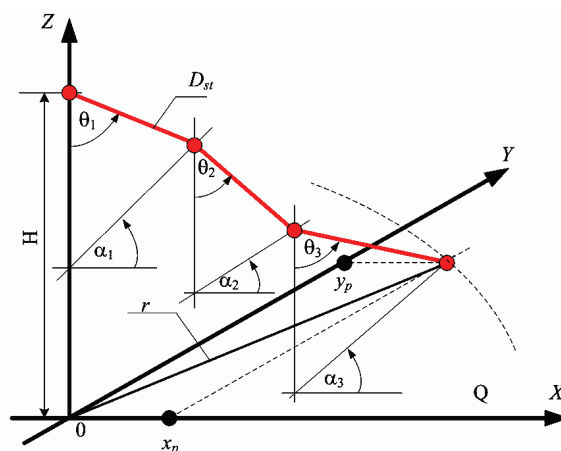


Рисунок 1 – Геометрическая модель движения длинной искры

Угол движения изменяется в интервале $\theta \in [0, \pi/2)$, а угол ориентировки в интервале $\alpha \in [0, 2\pi)$. После перемещения на величину шага D_{st} происходит переориентация направления движения, и искра перемещается в новом направлении на величину следующего шага и так далее до поражения плоскости (точка плоскости с координатами x_p и y_p – точка пересечения плоскости прямой линией, определяющей последний шаг движения искры). В модели принято, что шаг движения D_{st} является постоянной величиной.

Исходя из наблюдений развития молний и экспериментальных данных, предполагается, что углы, определяющие направление движения искры, являются случайными величинами. Проводя многократные расчеты по описанной модели при случайных значениях углов движения и ориентировки, можем получить функцию распределения точек поражения плоскости длинной искрой, которая, в силу симметрии разрядного промежутка, представима в виде $F(r) = \Phi(H, D_{st})$, где r – радиус расположения точек поражения плоскости в исходной системе координат (рис. 1).

Пусть имеется событие A , которое заключается в том, что искра совершает прямолинейное движение (шаг) в направлении плоскости (на рис. 2 – от т. 1 к т. 2). Величина шага движения D_{st} составляет часть расстояния D – расстояния от точки начала движения до плоскости в данном направлении. Тогда вероятность такого события $P(A)$ является вероятностью того, что движение искры осуществляется под углом α в горизонтальной плоскости и под углом θ в вертикальной плоскости. Для рассматриваемой модели, можно утверждать, что вероятность движения под углом α – $P(\alpha)$ не зависит от вероятности движения под углом θ – $P(\theta)$ и наоборот.

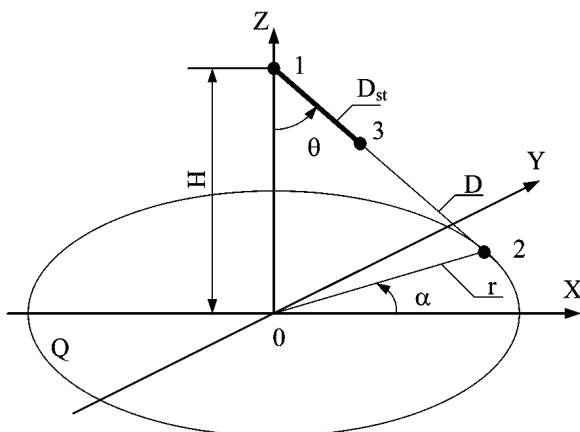


Рисунок 2 – Геометрическая модель первого шага движения длинной искры

Тогда вероятность события A равна $P(A) = P(\alpha)P(\theta)$. (1)

Исходя из симметричности модели в горизонтальной плоскости, угол α имеет равномерное распределение с плотностью

$$f(\alpha) = \frac{1}{2\pi}, \quad \alpha \in [0, 2\pi) \quad (2)$$

и функцией распределения

$$F(\alpha) = \frac{\alpha}{2\pi}, \quad \alpha \in [0, 2\pi). \quad (3)$$

Пусть известно, что движение искры происходит под углом θ , и известна вероятность этого события, которую представим в виде

$$p(\theta) = \frac{k}{D^m}. \quad (4)$$

где $m > 1$.

Вид зависимости (4) выбран исходя из известного факта, подтверждаемого многочисленными экспериментами: чем больше расстояние от точки начала движения разряда до точки на плоскости, тем меньше количество поражений плоскости искрой.

Используя геометрическое представление вероятностей [11] определим функцию распределения угла θ в виде

$$F(\theta) = \frac{\int_H^D \frac{k}{D^m} dD}{\int_H^\infty \frac{k}{D^m} dD}, \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{2}). \quad (5)$$

Вычисляя интегралы при $m > 1$, имеем

$$F(\theta) = 1 - \left(\frac{H}{D}\right)^{m-1}, \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{2}). \quad (6)$$

Подставив $D = H/\cos \theta$ (см. рис. 2), получим

$$F(\theta) = 1 - (\cos \theta)^{m-1}, \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{2}). \quad (7)$$

Тогда плотность распределения угла θ равна

$$f(\theta) = (m-1) \sin \theta (\cos \theta)^{m-2}, \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{2}). \quad (8)$$

Радиус точки на плоскости т.2, к которой движется искра определить из соотношения

$$r = D \sin \theta. \quad (9)$$

Используя материалы, приведенные в [11], определим плотность распределения радиуса

$$g(r) = f[\varphi(r)] |\varphi'(r)| = \frac{r^{m-1}}{D^2} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{r}{D}\right)^2} \right]^{m-3}, \quad (10)$$

где $\varphi(r) = \theta = \arcsin \frac{r}{D}$ – функция, обратная (9).

Тогда функция распределения радиуса определится из соотношения

$$G(r) = \int_0^r g(r) dr = 1 - \left[1 - \left(\frac{r}{D}\right)^2 \right]^{0,5(m-3)+1} \quad (11)$$

или определяя радиус через высоту ориентировки $r = H \operatorname{tg} \theta$ (12)

и проводя аналогичные преобразования, имеем плотность распределения в виде

$$g(r) = \frac{r^{m-1}}{H^2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} \right]^{-(m+1)} \quad (13)$$

и функцию распределения

$$G(r) = 1 - \left[1 + \left(\frac{r}{H} \right)^2 \right]^{1-0,5(m+1)} \quad (14)$$

Соотношения (11) и (14) могут быть использованы для определения распределения точек поражения плоскости в случае, если изначально $D_{st} > D$.

В общем случае для определения распределения точек поражения плоскости используем многошаговую процедуру, на каждом шаге которой производятся следующие действия.

Генерируем случайное значение угла движения θ , используя известную методику [11]:

– задаемся равномерно распределенным случайным значением F_{st} в интервале $[0, 1]$;

– используя (7), находим случайное значение угла движения из решения уравнения

$$F_{st} = 1 - (\cos \theta)^{m-1} \quad (15)$$

как

$$\theta = \arccos \left[\left(1 - F_{st} \right)^{\frac{1}{m-1}} \right]. \quad (16)$$

Генерируем случайное значение угла ориентирования в горизонтальной плоскости α

$$\alpha = 2\pi M_{sl}, \quad (17)$$

где M_{sl} – случайное число, равномерно распределенное в интервале $[0, 1]$.

Далее определяем расстояние до плоскости D в направлении луча, определяемого углами θ и α .

Если шаг движения D_{st} меньше расстояния до плоскости в данном направлении D , то двигаемся по лучу, определяемому углами θ и α на величину шага движения D_{st} . На каждом шаге вычисляем величину смещения по осям координат (на рис. 3: 1^* – начальная точка движения на данном шаге, 3^* – конечная точка движения на данном шаге):

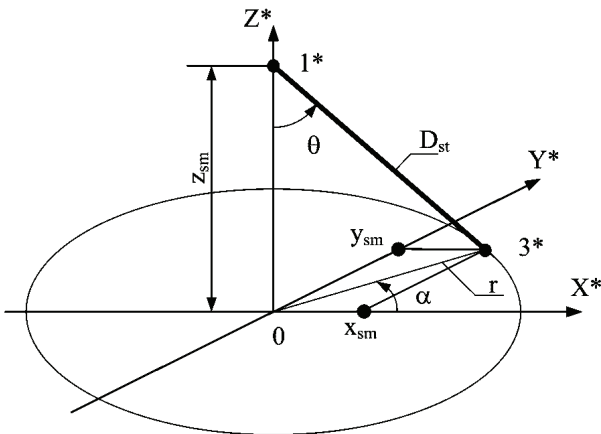


Рисунок 3 – Параметры, характеризующие шаг движения

– по оси OX^*

$$x_{sm} = r \cos \alpha = D_{st} \sin \theta \cos \alpha, \quad (18)$$

– по оси OY^*

$$y_{sm} = r \sin \alpha = D_{st} \sin \theta \sin \alpha, \quad (19)$$

– по оси OZ^*

$$z_{sm} = D_{st} \cos \theta. \quad (20)$$

Далее определяем координаты конечной точки движения

$$\begin{cases} x_{3^*} = x_{1^*} + x_{sm}, \\ y_{3^*} = y_{1^*} + y_{sm}, \\ z_{3^*} = z_{1^*} - z_{sm}. \end{cases} \quad (21)$$

При выполнении условия $D_{st} < D$ конечную точку движения на данном шаге принимаем за начальную точку движения на следующем шаге и повторяем вычисления по (16) – (21).

Если шаг D_{st} больше или равен расстоянию до плоскости в данном направлении D , то фиксируется факт поражения плоскости искрой и определяются координаты точки поражения (на рис. 4: 1^* – начальная точка движения на поражающем шаге, 2^* – точка поражения плоскости).

Координаты точки поражения определяются по соотношениям

$$\begin{cases} x_p = x_k + D \sin \theta \cos \alpha, \\ y_p = y_k + D \sin \theta \sin \alpha, \\ z_p = 0. \end{cases} \quad (22)$$

Для проведения численного моделирования в соответствии с описанным алгоритмом была разработана компьютерная программа в среде *Excel* с использованием *Visual Basic for Application*.

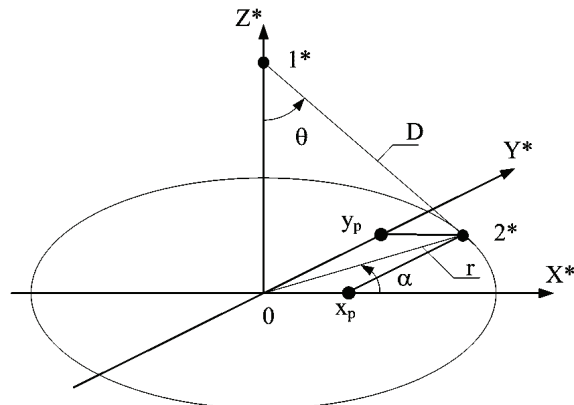


Рисунок 4 – Параметры, характеризующие последний (поражающий) шаг движения

Как следует из выражений (16) и (18) – (20), вариативными параметрами предложенной модели являются величины m и D_{st} , изменяя которые, мы можем выбрать лучший расчетный вариант при моделировании. В качестве меры совпадения расчетного и экспериментального распределения точек поражения плоскости был выбран критерий Колмогорова [12].

Постановка общей задачи исследования формулируется следующим образом.

Задача 1. Для имеющегося набора экспериментальных данных точек поражения плоскости $n = f(r)$ необходимо минимизировать целевую функцию вида

$$\Psi_{cel} = \min [\max |F_e(r) - F_m(r)|] \quad (0 \leq r < \infty), \quad (23)$$

изменяя вариативные параметры

$$m > 1, D_{st} \geq H,$$

где n – количество точек поражения, $F_e(r)$ – эмпирическая функция распределения радиуса точек поражения, $F_m(r)$ – функция распределения радиуса точек поражения, полученная при моделировании.

Задача 2. Для минимизированного варианта проверить гипотезу о согласии функций распределения, используя критерий [12]

$$d_{\max} = \max |F_e(r) - F_m(r)| \quad (0 \leq r < \infty). \quad (24)$$

Условие принятия гипотезы определяется неравенством

$$d_{\max} \leq k_{n,0,05}, \quad (25)$$

где $k_{n,0,05}$ – критическое значение критерия при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

В качестве опытных данных были использованы экспериментальные данные, приведенные в [7-10]. Модели разрядных промежутков, использованных в указанных работах, в которых формировался разряд длинной искры, показаны на рис. 5, а характеристики экспериментов приведены в табл. 1.

Следует отметить особенность модели, показанной на рис. 5, а: она является несимметричной относительно вертикальной оси верхнего электрода и имеет плоскость, расположенную над верхним электродом и соединена с ним [7], что не полностью соответствует принятой расчетной модели.

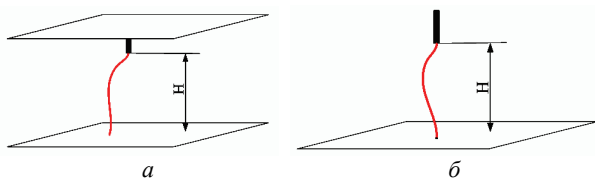


Рисунок 5 – Модели разрядных промежутков для экспериментов А, В (а); С, D, E, F (б)

В табл. 1 обозначено: n – общее количество экспериментальных точек; $K_{st} = D_{st} / H$ – коэффициент шага.

Таблица 1 – Характеристики экспериментов

Обозначение эксперимента	Параметры эксперимента					
	n	$H, \text{ м}$	m	K_{st}	d_{\max}	$k_{n,0,05}$
A	234	1,27	27	0,58	0,079	0,089
B	250	1,27	30	0,58	0,058	0,086
C	202	0,78	18	0,6	0,039	0,096
D	192	0,78	17	0,62	0,036	0,098
E	47	3	17	0,59	0,096	0,198
F	50	5	17	0,59	0,132	0,192
A+B	484	1,27	28,5	0,58	0,058	0,062
C+D	394	0,78	17,5	0,6	0,042	0,068

Характерные графики функции распределения радиуса точек поражения плоскости и относительной частоты поражения окружности радиусом r показаны

на рис. 6. На графиках сплошной линией показаны результаты моделирования, точками – экспериментальные данные.

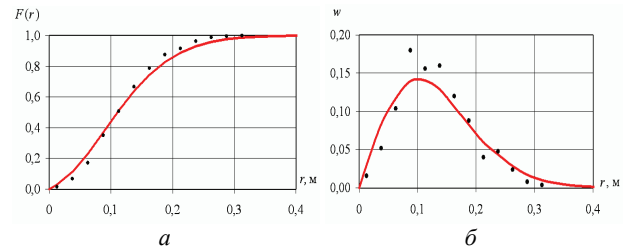


Рисунок 6 – Функция распределения радиуса точек поражения плоскости (а) и относительная частота поражения окружности (б) для эксперимента В

Ввиду того, что в работе [8, 10] было показано, что данные экспериментов А и В, а также С и D попарно принадлежат одним совокупностям, было проведено исследование с использованием совместных данных указанных экспериментов: соответственно А + В, и С + D.

Как видно из табл. 1, для всех экспериментов выполняется условие (25), что позволяет принять гипотезу о согласии эмпирических функций распределения радиуса точек поражения с функциями распределения радиуса точек поражения, полученными при моделировании, что свидетельствует об адекватности предложенной модели экспериментальным данным. Характерным для модели являются близкие значения ее вариативного параметра $K_{st} = 0,58 - 0,62$ для всех вариантов моделирования. Данные для вариативного параметра модели m позволяют констатировать его зависимость от вида системы полеобразования, в которой формируется разряд длинной искры. Однако для геометрически подобных систем его значения близки: для экспериментов, проводимых в системах, показанных на рис. 5а – $m = 27 - 30$; в системах, показанных на рис. 5б – $m = 17 - 18$.

Выводы. 1. Выведено соотношение для определения функции распределения угла движения длинной искры в предположении, что вероятность движения к точке плоскости обратно пропорциональна расстоянию от исходной точки движения до данной точки в степени большей единицы. Предложена модель поражения плоскости разрядом длинной искры.

2. Показано, что предложенная модель для диапазона изменения высот ориентировки от 0,78 м до 5 м адекватно описывает распределение точек поражения плоскости длинной искрой.

3. Близкие значения вариативных параметров модели m и K_{st} позволяют предложить модель для прогнозирования распределения точек поражения плоскости при больших значениях высоты ориентировки для геометрически подобных разрядных промежутков.

Материалы работы могут быть использованы для построения моделей поражения длинной искрой объектов, расположенных на плоской поверхности.

Список литературы: 1. Uman M. The Lightning Discharge / M. Uman. – N.Y.: Acad. Press, 1987. – 377 p. 2. Alexandrov G.N. New investigations in the lightning protection substations // G.N. Alexandrov, G. Berger, C. Gary. – CIGRE, 1994, Rep. 23/13-14. 3. IEC 62305-1, Ed. 1: Protection against lightning – Part 1: General Principles. – IEC, 2003. – 61 p. 4. Кобилюшко Д.Г. Статистическая двумерная модель разряда молнии на бесконечный прямолинейный проводник / Д.Г. Кобилюшко, А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – №16. – С. 118–126. 5. Кобилюшко Д.Г. Статистическая модель поражения плоскости разрядом молнии / Д.Г. Кобилюшко, А.А. Петков // Физические и компьютерные технологии: труды 17-й Международной научно-технической конференции (Харьков, 20–21 сентября 2011г.). – Х.: ХНПК "ФЭД", – 2011. – С. 153–155. 6. Куксов А.О. Імітаційне моделювання влучення розряду довгої іскри в точки площини в неоднорідному полі / А.О. Куксов, О.О. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 24 (1067). – С. 40–49. 7. Волкова О.В. Поражаемость искровым разрядом стержня на плоскости / О.В. Волкова, А.Р. Корявин // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 52–55. 8. Кобилюшко Г.М. Экспериментальное исследование поражения плоскости длиной искрой / Г.М. Кобилюшко, П.Н. Мельников, О.С. Недзельский и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 21. – С. 146–153. 9. Баранов М.І. Экспериментальные исследования поражения заземленной плоскости и размещенных на ней объектов электрическим разрядом в длинном промежутке / М.І. Баранов, В.І. Доценко, В.М. Зиньковский и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 27. – С. 11–20. 10. Кобилюшко Г.М. Влияние конфигурации системы электродов на распределение точек поражения плоскости длиной искрой / Г.М. Кобилюшко, П.Н. Мельников, О.С. Недзельский и др. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 60. – С. 57–70. 11. Korn, G. Mathematical handbook for scientists and engineers / G. Korn, T. Korn. – N. Y.: McGraw-Hill Book Company, 1968. – 832 p. 12. Hauschild V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik / V. Hauschild, V. Mosch. – Berlin: VEB Verlag Technik, 1984. – 312 s.

Bibliography (transliterated): 1. Uman M. The Lightning Discharge. M. Uman. N.Y.: Acad. Press, 1987. 377. Print. 2. Alexandrov G.N. New investigations in the lightning protection substations. G.N. Alexandrov,

G. Berger, C. Gary. CIGRE, 1994, Rep. 23/13-14. Print. 3. IEC 62305-1, Ed. 1: Protection against lightning. Part 1: General Principles. IEC, 2003. 61. Print. 4. Koliushko D.G. Statisticheskaya dvumernaya model razryada molnii na beskonечnyy pryamolineynyy provodnik. D.G. Koliushko, A.A. Petkov. Visnik Natsionalnogo tehničnogo unіversitetu "Kharkivskiy politehničniy Institut". Zbirnik naukovih prats. Tematichniy vipusk: Tehnika i elektrofizika visokih naprug. – Kharkiv: NTU "KhPI". 2011. No 16. 118–126. Print. 5. Koliushko D.G. Statisticheskaya model porazheniya ploskosti razryadom molnii. D.G. Koliushko, A.A. Petkov. Fizicheskie i kompyuternye tehnologii: trudy 17-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Kharkiv, 20–21 sentyabrya 2011g.). Kharkiv: HNPK "FED", 2011. 153–155. Print. 6. Kuksov A.O. Imitatsiyne modelyuvannya vlučennya rozryadu dovgoyi iskry v točki ploschiny v neodnorodnomu poli. A.O. Kuksov, O.O. Petkov. Visnik Natsionalnogo tehničnogo unіversitetu "Kharkivskiy politehničniy Institut". Zbirnik naukovih prats. Seriya: Energetika: nadiynist ta energoefektivnist. Kharkiv: NTU "HPI". 2014. No 24 (1067). 40–49. Print. 7. Volkova O.V. Porazhaemost iskrovym razryadom sterzhnya na ploskosti. O.V. Volkova, A.R. Koryavin. Elektrichestvo. 1991. No 5. 52–55. Print. 8. Koliushko G.M. Eksperimentalnoe issledovanie porazheniya ploskosti dlinnoy iskroy. G.M. Koliushko, P.N. Melnikov, O.S. Nedzelskiy i dr. Visnik Natsionalnogo tehničnogo unіversitetu "Kharkivskiy politehničniy Institut". Zbirnik naukovih prats. Tematichniy vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "KhPI". 2012. No 21. 146–153. Print. 9. Baranov M.I. Eksperimentalnye issledovaniya porazheniya zazemlennoy ploskosti i razmeschennyih na ney ob'ektov elektricheskim razryadom v dlinnom promezhutke. M.I. Baranov, V.I. Dotsenko, V.M. Zinkovskiy i dr. Visnik Natsionalnogo tehničnogo unіversitetu "Kharkivskiy politehničniy Institut". Zbirnik naukovih prats. Tematichniy vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "KhPI". 2013. No 27. 11–20. Print. 10. Koliushko G.M. Vliyanie konfiguratsii sistemiy elektrodov na raspredelenie toček porazheniya ploskosti dlinnoy iskroy. G.M. Koliushko, P.N. Melnikov, O.S. Nedzelskiy i dr. Visnik Natsionalnogo tehničnogo unіversitetu "Kharkivskiy politehničniy Institut". Zbirnik naukovih prats. Tematichniy vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "HPI". 2013. No 60. 57–70. Print. 11. Korn, G. Mathematical handbook for scientists and engineers. G. Korn, T. Korn. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1968. 832. Print. 12. Hauschild V. Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik. V. Hauschild, V. Mosch. Berlin.: VEB Verlag Technik, 1984. 312 Print.

Поступила (received) 13.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петков Александр Александрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Инженерная электрофизика», Национальный технический университет «ХПИ»; тел.: (067) 572–00–58; e-mail: apetkov@yandex.ua.

Petkov Alexander Alexandrovich – Doctor of technical sciences, Senior researcher, Professor of the Department "Engineering Electrophysics", National Technical University "KhPI"; tel.: (067) 572–00–58; e-mail: apetkov@yandex.ua.

УДК 621.317.08

В. В. ПИЛИНСКИЙ, А. С. ЧУПАХИН, Р. А. СИРОТА**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ПОМЕЩЕНИИ АППАРАТНОЙ КИНОКОНЦЕРТНОГО КОМПЛЕКСА**

Выполнена оценка уровней электромагнитных полей внутри помещения аппаратной. Проанализировано оборудование аппаратной киноконцертного комплекса: источники и рецепторы непреднамеренных электромагнитных помех. Предложен алгоритм описания электромагнитной обстановки внутри помещения киноконцертного комплекса, оборудованного функциональной аппаратурой различного назначения. Реализована прикладная программа, в которой использована методика итеративного моделирования. Представлены результаты моделирования электромагнитных полей внутри помещения аппаратной киноконцертного комплекса.

Ключевые слова: электромагнитная обстановка, электромагнитная совместимость, киноконцертный комплекс, источник помех, рецептор помех, нормы эмиссии, чувствительность, прогнозирование, моделирование

Введение. В современных условиях интенсивного увеличения функциональных возможностей радиоэлектронной аппаратуры при одновременном повышении чувствительности устройств, требования к выбору и применению средств обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) оборудования существенно возрастают.

Пример крупного объекта, оснащенного функционально-разнообразной аппаратурой, с широким диапазоном чувствительности и полос рабочих частот – современный киноконцертный комплекс. Основное место формирования сложной электромагнитной обстановки (ЭМО) – аппаратная комплекса.

Для рационального решения задачи обеспечения ЭМС киноконцертного комплекса необходимо проводить исследование и контроль ЭМО на объектах для зрелищных мероприятий перед размещением в них современной информационной, звукотехнической, силовой и др. аппаратуры с целью прогнозирования условий обеспечения ЭМС.

При современном подходе к проектированию зданий и сооружений особое значение приобретает возможность использования программных средств анализа, которые позволяют выполнить анализ ЭМО на ранних стадиях проектирования.

Сведения о прогнозировании и контроле электромагнитной обстановки в промышленных, офисных и бытовых помещениях приведены в работах, в частности, [1, 2]. На международной конференции Общества инженеров акустиков (AES 51st Conference, Helsinki, Finland - August 21-24, 2013) [3] обусловлена актуальность вопросов обеспечения ЭМС в профессиональном звуковом оборудовании. Информация по проблеме обеспечения ЭМС профессионального оборудования, используемого в кинотеатрах, концертных залах, театрах, открытых концертных площадках, те в индустрии медиа развлечений (запись и воспроизведение музыки, фильмов, видео) приведена в работах [4–6].

На основе сравнительного анализа [7] показано, что, несмотря на наличие ограничений, установленных регламентирующими документами на уровни эмиссии [8], проблема обеспечения ЭМС аппаратуры киноконцертного комплекса и источников непреднамеренных электромагнитных помех не утрачивает актуальность [9]. В современных условиях необходи-

мо постоянно совершенствовать: метод прогнозирования уровней электромагнитных помех для обоснованного применения помехоподавляющих средств: сетевых и информационных фильтров, экранирующих устройств и др.

Отметим так же, что для принятия решения о выполнении требований обеспечения ЭМС необходимо учитывать определенный запас [7].

Таким образом актуальность исследования прогнозируемой ЭМО обусловлена, с одной стороны, увеличением числа радиоэлектронных средств различного назначения, плотности их размещения и, с другой стороны, вследствие возрастания чувствительности аппаратуры. Первый фактор приводит к усложнению ЭМО источниками помех, а второй усугубляет незащищенность рецепторов.

Цель работы. Создание программного модуля, как основы автоматизированной системы электромагнитного мониторинга помещений киноконцертного комплекса для моделирования ЭМО помещения аппаратной.

Практическая суть работы состоит в разработке метода определения состояния электромагнитной обстановки с помощью пространственной картины электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) и – прикладной программы для реализации интегрированного контроля электромагнитной эмиссии от различных источников в диапазоне исследуемых частот, а также компьютерное моделирование электромагнитных полей.

Источники и рецепторы электромагнитных помех. Киноконцертный комплекс представляет сложную систему взаимовлияющего в аспекте обеспечения электромагнитной совместимости оборудования. Методика практической реализации создания модели технологического помещения предусматривает 2 этапа:

1) сбор исходных данных по литературе или измерения ЭМО (in situ), например представленные в [10];

2) компьютерное моделирование электромагнитного поля; например представленные в [11, 12];

Комплекс приборов в аппаратной, как источников и рецепторов непреднамеренных помех приведен в табл. 1.

Данные, приведенные в табл. 1, убедительно подтверждают тезис о сложном характере формирования

ЭМО киноконцертного комплекса как по видам и классам аппаратуры, так и по параметрам чувствительности и диапазонам частот.

Таблица 1 – Источники и рецепторы электромагнитных помех в аппаратной

Источники	Диапазон частот
1. Видеосервер Мощность 500 Вт	50 Гц – 1000 МГц
2. Источник бесперебойного питания Мощность 0,5-10 кВт	50 Гц, 20 – 100 кГц
3. Видеопроектор DLP Мощность 600 Вт	
частота строчной развертки	30 – 100 кГц
частота кадровой развертки	24 – 120 Гц
блок поджига ксеноновой лампы	1000 МГц
выпрямитель питания ксеноновой лампы	300 Гц
4. Радиомикрофон	
Мощность излучения передатчика 10 мВт	
Чувствительность: 14 дБмкВ/м	220 – 270 МГц
24 дБмкВ/м	470 – 862 МГц
5. Wi-fi роутер	
мощность сигнала ≤ 100 мВт	2.4 ГГц
мощность сигнала ≤ 200 мВт	5 ГГц
Чувствительность: 65 дБмкВ/м	2.4 ГГц
58 дБмкВ/м	5 ГГц
6. Мобильный радиотелефон (CDMA)	
Мощность 0,6 Вт	
Чувствительность: 33 дБмкВ/м	824 – 849 МГц
7. Контрольный монитор Мощность 130 Вт	
сетевой трансформатор блока питания	50 Гц
статический преобразователь напряжения в импульсном блоке питания	20 – 100 кГц
блок кадровой развертки и синхронизации	48 – 160 Гц
блок строчной развертки и синхронизации	15 – 110 кГц
8. Темнитель света	
Мощность 2500 ВА	50 Гц

Моделирование ЭМО. Для описания электромагнитной обстановки внутри помещения использована методика итеративного моделирования.

Алгоритм программы представлен на рис.1. Работу с программой начинают с занесения исходных данных [10] (положение непреднамеренного источника помех в помещении аппаратной, мощность эмиссии помех, диапазон частот). На основании входных данных программа моделирует карту электромагнитной обстановки внутри помещения. Коэффициент поглощения можно изменять от 0 до 1 в зависимости от свойств материалов. Программа реализует вычисления суммарного уровня напряженности электрического поля от всех источников эмиссии, расположенных в аппаратной по принципу суперпозиции для одинаковых частот, а также предоставляет информацию о влиянии каждого источника в отдельности в виде секторной диаграммы.

Вблизи источника свойства поля определяют преимущественно характеристики источника. На расстоянии от источника свойства поля зависят преимущественно от среды, в которой распространяется поле. Поэтому пространство, вокруг источника разделяют на две основные области: ближнюю зону (зона индукции) и дальнюю зону (зона излучения). На

расстоянии, превышающем $\lambda/2\pi$ – для элементарных излучателей (λ – длина волны), действует дальнее поле. Для любого эмитирующего электромагнитное поле элемента граничное расстояние: $r_{cp} \geq 2l^2/\lambda$, где l – максимальный размер объекта-излучателя.

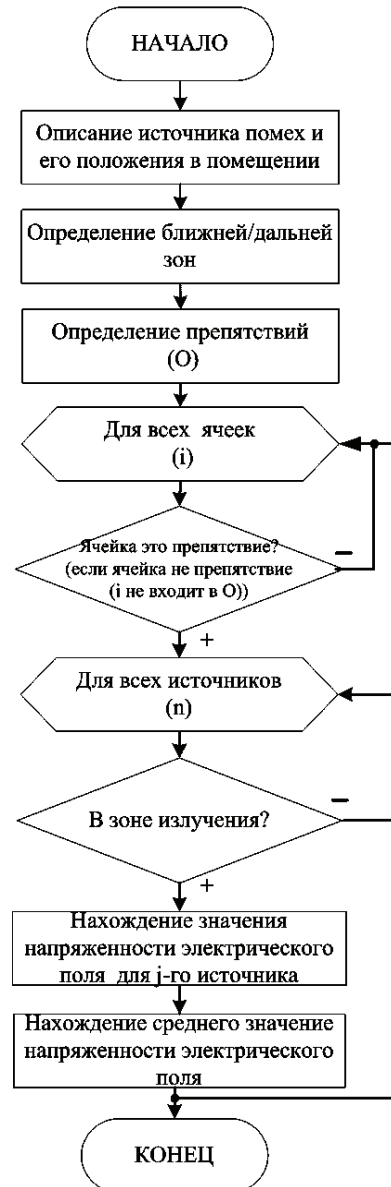


Рисунок 1 – Алгоритм моделирования электромагнитной обстановки в киноконцертном комплексе

Для описания ЭМО использована базовая модель элементарных эмиттеров, формула из [13].

Предложенный метод основан на разбиении всего помещения на сетку состоящую из множества сегментов, что позволяет производить вычисления в каждом отдельном сегменте. Размер сегментов принят равным 0.1×0.1 м. Каждый из источников представленный, в табл. 1, в произвольном сегменте на расстоянии d создает электрическое поле.

$$E_{r(d)} = \frac{2E_0 d_0 2\pi h_t h_r}{d^2},$$

где $E_{r(d)}$ – напряженность электрического поля в произ-

вольном сегменте аппаратной на расстоянии d ; E_0 – напряженность электрического поля в сегменте излучения $d_0 = 0,1$ м; h_r, h_t – высота источника и приемника.

$$E_0 \frac{\sqrt{30 \cdot P_t \cdot G_t}}{d},$$

где P_t – мощность передатчика; G_t – коэффициент усиления передающей антенны.

Разработанная прикладная программа, написана в среде Microsoft Visual Studio [14] на языке C# [15], позволяет определить суммарный средний уровень напряженности электрического поля, создаваемый в помещении аппаратной и оценить уровень напряженности электрического поля излучаемого от каждого источника в интересующей области пространства.

Программа позволяет промоделировать воздействие n -ого количества источников помех в дальней зоне в каждой точке пространства без учета интерференции. Максимально возможное количество источников электромагнитного излучения ($n = 1 \dots 500$).

На рис. 2 представлены результаты моделирования ЭМО в помещении аппаратной площадью $11,5 \text{ м}^2$. Для моделирования использовано оборудование, которое на рис. 2 соответствует нумерации: 1 – видеосервер; 2 – источник бесперебойного питания; 3 – видеопроектор DLP; 4 – радиомикрофон; 5 – wi-fi роутер; 6 – мобильный радиотелефон; 7 – контрольный монитор; 8 – темнитель света. Помещение аппа-

ратной представлено в виде 1156 отдельных сегментов. Информация, отображаемая в сегменте (E – напряженность электрического поля, В/м) характеризует суммарный средний уровень напряженности электрического поля. Для получения информации о напряженности электрического поля по каждому источнику в отдельности, достаточно выбрать интересующий сегмент, после чего будет отображена подробная информация по каждому источнику в виде секторной диаграммы.

Программа реализует вычисления суммарного уровня напряженности электрического поля от всех источников эмиссии, расположенных в аппаратной по принципу суперпозиции для одинаковых частот, а также предоставляет информацию о влиянии каждого источника в отдельности в виде секторной диаграммы, что отображено на рис.2.

Полученные результаты дают проектанту оценочную картину воздействия источников помех в интересующей области пространства с учетом естественных или специально установленных препятствий и позволяет на основании полученной картины предпринять необходимые меры по обеспечению электромагнитной совместимости, например: физического планирования или применения специальных экранов для уменьшения воздействия на чувствительное оборудование.

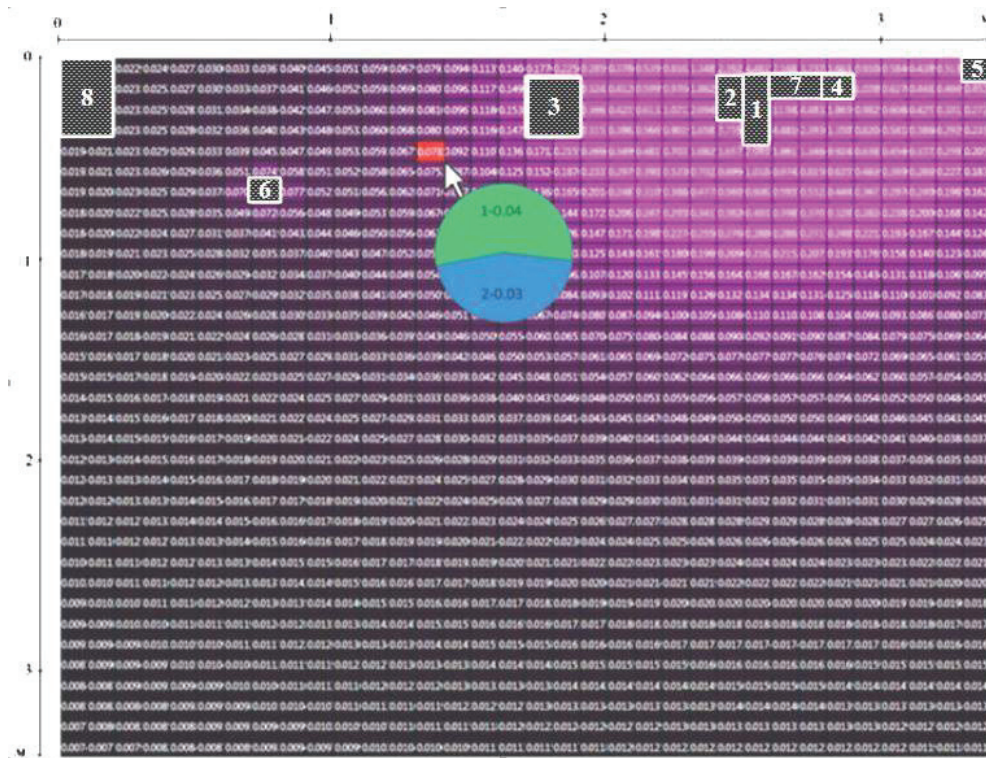


Рисунок 2 – Пример моделирования ЭМО в аппаратной

Выводы. 1. Обоснована необходимость прогнозирования электромагнитной обстановки в функционально насыщенных помещениях (аппаратная, микшерная, другие технологические помещения) киноконцертного комплекса.
2. Предложена прикладная программа для зон

электромагнитного поля с возможностью визуализации прогнозируемой электромагнитной обстановки и формулирования рекомендаций.

3. На примере конкретного комплекса приборов как источников, так и рецепторов непреднамеренных помех в аппаратной киноконцертного комплекса показано об-

ласти в помещении с завышенным уровнем напряженности электрического поля и возможности выявлять, какие источники влияют более существенно на суммарный уровень напряженности электрического поля.

4. Полученные результаты позволяет проектанту принимать обоснованные решения о необходимости использования дополнительных средств по обеспечению электромагнитной совместимости в помещении, например: физическое разнесение аппаратуры, использование защитных экранов и др.

5. Нетривиальной задачей остается моделирование электромагнитных полей в ближней зоне для магнитных и электрических излучателей и разработка автоматизированной системы, позволяющей выполнять моделирование электромагнитных процессов для формирования полноценной электромагнитной картины, что представляет предмет дальнейших исследований.

Список литературы: 1. Маслов М. Ю. Численный анализ электромагнитной обстановки в офисном помещении / М. Ю. Маслов // *Vestnik SONIR* 2004. – № 1 – С. 162–168. 2. Антипова С.Е. Методы прогнозирования электромагнитной обстановки на рабочих местах предприятий электроэнергетики и связи / С.Е. Антипова, В.А. Романов // *Радиотехника*. 2001. – № 9. – С. 81–85. 3. URL: <http://www.aes.org/conferences/51/program.cfm> (дата обращения: 21.10.2015). 4. Оникенко Ю. А. Прогнозирование кондуктивных помех усилителя класса D / Ю. А. Оникенко, В. В. Пилинский, В. Б. Швайченко // *Технологии электромагнитной совместимости*. – 2014. № 1(48). – С. 3–9. 5. Handbook for Sound Engineers (V edition) / Ed. by G. M. Ballou. – Oxford: Focal Press Publ., 2015. – 1784 p., ISBN-10: 041584293X. 6. Mei Z. L. Transparent shells – invisible to electromagnetic waves / Z. L. Mei, T. J. Cui // *Progress In Electromagnetics Research*, 2009. – Vol. 18. – P. 149–163. 7. Пилинский В. В. Анализ допустимых регламентированных уровней эмиссии и чувствительности оборудования киноконцертного комплекса / В.В. Пилинский, А.С. Чупахин, В.Б. Швайченко, А.А. Довженко // *Технологии ЭМС*. – 2015. – № 3 (54). – С.18–25. 8. Электромагнітна сумісність. Професійна аудіо-, відео- й аудіовізуальна апаратура та апаратура керування освітлювальними установками. Частина 1. Емісія. Норми та методи вимірювання: ДСТУ 4210-2003 (EN 55103-1:1996, MOD) – 2005. – Введ. 2005-07-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 24 с. 9. Armstrong K. AES-X13 and interference-free pro-audio systems / K. Armstrong, T. Waldron // *IEEE International Symposium. «EMC 2002», Sorrento, Italy, 2002.* – Vol. 1. – P. 434 – 439. 10. Пилинский В.В. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 2 – Формирование электромагнитной обстановки силовыми цепями киноконцертного оборудования / В.В. Пилинский, М.В. Родионова, А.С. Чупахин // *Техническая электродинамика. – Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность».* – 2009. – № 4. – С. 3-9. 11. Пилинский В.В. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 3. Расчет электромагнитных полей в функционально насыщенном помещении / В.В. Пилинский, В.Б. Швайченко, А.С. Чупахин // *Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая*

электроника и энергоэффективность». – 2012. – № 1. – С. 135-140. 12. Бuzов А. Л. Моделирование электромагнитных полей, возникающих за счет антенного эффекта технических средств в закрытых помещениях / А. Л. Бuzов, М. Ю. Маслов // *Антенны и электродинамика СВЧ*. – 2002. – № 7. – С. 9-12. 13. *Electromagnetic Field, Health and Environment: Proceedings of EHE'07 (Vol. 29)* / A. Krawczyk, R. Kubachi, S. Wiak, C. Lemon Antunes (Eds.) // IOS Press, Amsterdam: McGraw Hill Professional. – 2008. – 272 P. ISSN 1383-7281. 14. Johnson, B. *Professional Visual Studio 2012* / B. Johnson. – New York. Wrox Publ., 2012. – 1104 p. 15. Schildt H. *C# 4.0 The Complete Reference* / H. Schildt. – McGraw Hill Professional, NY: McGraw Hill Professional, 2010. – 976 p., ISBN-13: 978-0071741163.

Bibliography (transliterated): 1. Maslov, M. Y. Chislennyj analiz jelektromagnitnoj obstanovki v ofisnom pomeshhenii. M. Y. Maslov. Herald SONIR. 2004. No 1. 162–168 Print. 2. Antipova S.E. Metody prognozirovanija jelektromagnitnoj obstanovki na rabochih mestah predpriyatij jelektrojenergetiki i svjazi. S.E. Antipova, V.A. Romanov. Radio-tehnika. 2001. No 9. 81–85 Print. 3. URL:<http://www.aes.org/conferences/51/program.cfm>. 4. Onikienko J.A. Predicting Prognozirovanie konduktivnyh pomeh usilitelja klassa D. Y.A. Onikienko, V.V. Pilinsky, V.B. Shvaychenko. Tehnologii jelektromagnitnoj sovmestimosti. 2014. No 1 (48). 3–9 Print. 5. Handbook for Sound Engineers (V edition). Ed. by G. M. Ballou. Oxford: Focal Press Publ. 2015. 1784 Print. 6. Mei Z. L. Transparent shells – invisible to electromagnetic waves. Z. L. Mei, T. J. Cui. Progress In Electromagnetics Research. 2009. Vol. 18. 149–163 Print. 7. Pilinsky V.V. Analysis of the allowable regulated levels of emissions and the sensitivity of equipment cinema and concert complex. V.V. Pilinsky, A.S. Chupakhin, V.B. Shvaychenko, A.A. Dovzhenko. Technologies EMC. 2015. No 3 (54). 18–25 Print. 8. DSTU 4210-2003, Elektromagnitna sumisnist'. Profesijna audio-, video- j audiovizual`na apparatura ta apparatura keruvannya osvituval`ny`my` ustanovkamy`. Chasty`na 1. Emisiya. Normy` ta metody` vy`miryuvannya: (EN 55103-2:1996, MOD). 2005. 24 Print. 9. Armstrong, K., Waldron, T. AES-X13 and interference-free pro-audio systems. IEEE International Symposium. EMC 2002, Sorrento, Italy. 2002. Vol. 1. 434–439 Print. 10. Pilinsky V. V. Osobennosti obespechenija jelektromagnitnoj sovmestimosti sovremennoho kinokoncertnoho kompleksa. Chast' 2 – Formirovanie jelektromagnitnoj obstanovki silovymi cepjami kinokoncertnoho oborudovanija. V. V. Pilinsky, M. V. Rodionova, A. S. Chupakhin. Tehnicheskaja jelektrodinamika. Tematicheskij vypusk «Silovaja jelektronika i jenergojeffektivnost'». 2009. Vol. 4. 3–9 Print. 11. Pilinsky V. V. Osobennosti obespechenija jelektromagnitnoj sovmestimosti sovremennoho kinokoncertnoho kompleksa. Chast' 3. Raschet jelektromagnitnyh polej v funkcional'no nasyshhennom pomeshhenii. V.V. Pilinsky, V.B. Shvaychenko, A.S. Chupakhin. Tehnicheskaja jelektrodinamika. Tematicheskij vypusk «Silovaja jelektronika i jenergojeffektivnost'». 2012. No 1. 135–140 Print. 12. Buzov, A.L. Modelirovanie jelektromagnitnyh polej, vznikajushih za schet antennoho jeffekta tehnicheskikh sredstv v zakrytyh pomeshhenijah. A.L. Buzov, M. Y. Maslov. Anteny i jelektrodinamika SVCh. 2002. No 7. 9-12 Print. 13. *Electromagnetic Field, Health and Environment: Proceedings of EHE'07 (Volume 29)*. Krawczyk A., Kubachi R., Wiak S., Lemon Antunes C. (Eds.). IOS Press, Amsterdam: McGraw Hill Professional. 2008. 272 Print. 14. Johnson B. *Professional Visual Studio 2012*. B. Johnson. New York. Wrox Publ., 2012. 1104 Print. 15. Schildt H. *C# 4.0 The Complete Reference*. H. Schildt. McGraw Hill Professional, NY: McGraw Hill Professional, 2010. 976 Print.

Надійшла (received) 31.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пилинский Владимир Владимирович – кандидат технических наук, профессор Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»; тел.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

Pilinsky Vladimir Vladimirovich – candidate of engineering sciences, professor, NTUU «KPI», Kiev, tel.: (095) 276-92-70; e-mail: pww@ukr.net.

Чупахин Александр Сергеевич – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (050) 698-67-77; e-mail: chupe@ukr.net.

Chupakhin Alexander Sergeevich – postgraduate, NTUU «KPI», Kiev, tel.: (050) 698-67-77; e-mail: chupe@ukr.net.

Сирота Роман Александрович – технический директор «GEAR Electronics», Киев, тел.: (066) 703-53-81; e-mail: sir.intellect@gmail.com

Sirota Roman Alexandrovich – technical director, «GEAR Electronics», Kiev, tel.: (066) 703-53-81; e-mail: sir.intellect@gmail.com

УДК 621.317.318

И. А. ПОСТЕЛЬНИК, С. П. ШАЛАМОВ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРЕДГРОЗОВОЙ ОБСТАНОВКЕ

Приведен сравнительный анализ средств измерения напряженности электростатического поля в атмосфере Земли в предгрозовой обстановке. Рассмотрены физические основы метода измерения напряженности электростатического поля посредством электрической индукции. Указаны основные преимущества и недостатки средств измерения, использующих метод электрической индукции. Содержится описание технологии микромеханических средств измерения напряженности электростатического поля. Показана возможность локального мониторинга предгрозовой обстановки, для определения вероятности возникновения молниевых разрядов за счет измерения электростатического поля, возникающего между заряженным облаком и поверхностью земли.

Ключевые слова: электростатическое поле, роторный вольтметр, вибрационный вольтметр, МЭМС технология, молния, заряды, электрическая индукция.

Введение. В атмосфере Земли всегда существует электрическое поле, которое создается отрицательным зарядом Земли. Характеристикой этого поля в любой точке служит напряженность E_0 или градиент потенциала (E_0 – производная от потенциала по нормали к поверхности Земли). У поверхности Земли напряженность E_0 в среднем имеет значение 130 В/м. Электрическое поле атмосферы зависит от множества факторов (облаков, осадков, грозовой деятельности, условий местности и т.п.) и поэтому очень изменчиво. Градиент потенциала может меняться от нескольких десятков до сотен тысяч вольт на метр [1]. Заряд грозового облака связан с его поляризацией – концентрацией водяных паров восходящих потоков влажного воздуха на положительных и отрицательных ионах (центрах конденсации) и разделением заряженных капелек влаги. Электрические заряды элементов облака сильно искажают «нормальное» электрическое поле атмосферы. Резкие изменения этих объемных зарядов (особенно в грозовых облаках) сказываются на изменении электрического поля у земной поверхности. Для возникновения молнии необходимо, чтобы в относительно малом объеме облака образовалось электрическое поле с напряженностью, достаточной для начала электрического разряда (1 МВ/м), а в значительной части облака существовало бы поле со средней напряженностью, достаточной для поддержания начавшегося разряда (0,1–0,2 МВ/м) [1]. Так как в грозовом облаке в процессе его электризации возникают электрические поля, напряженность которых достигает нескольких сотен киловольт на метр то между облаком и Землей возникает искровые разряды в виде молний.

Измерение электрического поля атмосферы Земли позволяет производить локальный мониторинг предгрозовой обстановки определяя вероятность возникновения молниевых разрядов.

Целью работы является проведение сравнительного анализа средств измерения электростатического поля в атмосфере Земли в предгрозовой обстановке.

Принцип измерения. Если между изолированным электродом H и двумя заземленными электродами SR и A (рис. 1) приложить разность потенциалов U ,

то возникнет электростатическое поле, которое создаст на поверхности измерительного электрода A напряженность $E(f)$, зависящую от элемента поверхности df . Если поле создается в газе с практически неполярными молекулами или вакууме, то на поверхности электрода A индуцируется заряд плотностью $\sigma = \epsilon_0 E(f)$ и общий заряд на электроде площадью F [1]:

$$q(F) = \int_F \sigma df = \epsilon_0 \int_F E(f) df. \quad (1)$$

Заряд $q(f)$ при формировании поля или изменении во времени напряжения $U(f)$ вызывает ток, который должен проходить по соединительному проводнику к электроду A , и формулу (1) целесообразно записать в более общем виде

$$q(F, t) = \epsilon_0 \int_F E(f, t) df. \quad (2)$$

Вместо напряженности $E(f, t)$ для конкретной конфигурации поля можно записать напряжение $U(f)$, рассчитываемое как интеграл $\int E(s) ds$ по пути между электродами H и A . Заряд q определяется с использованием частичной емкости C' , которая обусловлена потоком силовых линий, заканчивающихся на площади электрода A , заключенного в объеме, ограниченном штриховыми линиями на рис. 1:

$$q(F, t) = C'(F) \int_s E(s, t) ds = C'(F) U(t). \quad (3)$$

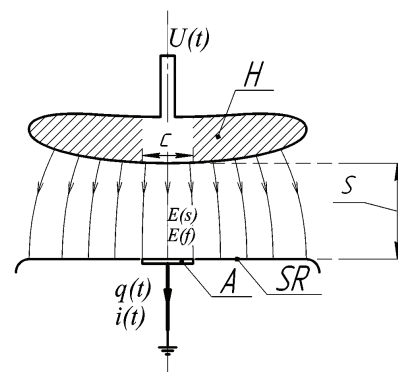


Рисунок 1 – Электродная система индукционного вольтметра

Из (2) и (3) получаем

$$C'(F) = \frac{q(F, t)}{U(t)}. \quad (4)$$

Если между электродами имеется однородное поле, то из (4) получается известная формула для плоского конденсатора

$$C'(F) = \epsilon_0 \frac{F}{s}. \quad (5)$$

Следовательно, наведенный заряд $q(f, t)$ может быть использован для измерения как напряженности, так и напряжения. Если в дальнейшем иметь в виду (3), то легко показать, что изменение заряда во времени происходит как за счет изменения напряжения $U(t)$, так и за счет изменения площади электрода во времени $F(t)$. При однократном изменении, например, при включении или отключении источника напряжения или открытии и закрытии электрода A заземленной металлической пластиной, как это делал Вильсон при измерении напряженности поля земли [2], трудно измерить индуцированный заряд. Однако при непрерывном изменении соответствующим прибором можно измерить непрерывный ток:

$$i(F, t) = \frac{dq}{dt}. \quad (6)$$

Все разновидности приборов, основанных на индукционном принципе, описываются приведенными исходными уравнениями (1) – (6). Они отличаются друг от друга лишь тем, какое напряжение (или напряженность) измеряется: постоянное, синусоидальное переменное или изменяющееся во времени по любому закону. Реализуемое конструктивным путем изменение во времени емкости C' представляет собой очень результативное вспомогательное средство улучшения характеристик устройства, что будет продемонстрировано некоторыми примерами.

Роторный вольтметр. Роторный вольтметр основан на принципе индукции зарядов. Все измерительные приборы, работающие по принципу индукции, не потребляют от источника измеряемого напряжения активной мощности, если электрическое поле является чисто электростатическим или создается в газовом пространстве при слабой напряженности поля, когда не возникают частичные разряды и объемный заряд. Это условие должно выполняться всегда, так как заряд, необходимый для измерения, создается за счет индукции, а не движения свободных носителей зарядов в электрическом поле. Поскольку при измерении не потребляется активной мощности, то эти приборы следует отнести к категории приборов с высоким входным сопротивлением, не свойственным даже самым совершенным электронным приборам. Роторные вольтметры достаточно широко применялись для измерения высокого напряжения в генераторах Ван де Графа [2]. В этих вольтметрах использовался компенсационный принцип измерения. Этот принцип требует наличия двух вращающихся крыльчаток и дополнительного электрода, на который необходимо подать компенсирующее напряжение.

Обычно величина этого напряжения составляет

несколько киловольт. Для минимизации размеров и упрощения конструкции можно отказаться от компенсационного принципа, так как требуемая точность заведомо обеспечивается и прямыми методами.

Конструкция, использованная уже в 1937 г. для измерения постоянного напряжения до 2,16 МВ, показана на рис. 2. [2].

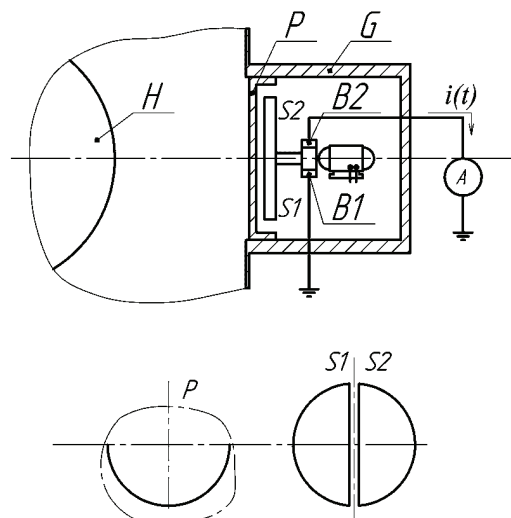


Рисунок 2 – Роторный вольтметр [2]

При постоянной частоте вращения двигателя две металлические секторные шайбы S_1 и S_2 , изолированные между собой, попеременно вводятся в область электрического поля, создаваемого приложенным к электроду H постоянным напряжением. Непрерывное изменение емкости создается за счет металлической пластины P , закрепленной на корпусе прибора G и имеющей полукруглый вырез. Обе секторные шайбы S_1 и S_2 , служащие в качестве измерительных электродов, образуют с коммутатором и его щетками B_1 и B_2 изолированную от вала двигателя, но находящуюся под потенциалом земли систему. Амперметром измеряется ток, возникающий между секторными шайбами. Используемые в данном устройстве вращающиеся секторные шайбы, служащие измерительными электродами, обладают недостатком, связанным с необходимостью применения вращающегося коммутатора. Поэтому гораздо чаще встречаются конструкции, где электрод, на котором наводится заряд неподвижен, а над ним вращается заземленная секторная шайба необходимой конфигурации, периодически закрывающая и открывающая измерительный электрод, причем секторная шайба полностью перекрывает измерительный электрод. Измерение переменного тока, проходящего между измерительным и заземленным электродами, временная зависимость которого обусловлена формой электродов и изменением емкости, а значение – измеряемым напряжением, не вызывает трудностей.

Так как индуцированный на секторных шайбах заряд при постоянной частоте вращения двигателя увеличивается или уменьшается по линейному закону (рис. 3), то при постоянном напряжении согласно (6) в измерительной цепи проходит постоянный ток:

$$I = U \frac{\Delta C}{T_c/2} = 2f_c \Delta C U. \quad (7)$$

Частота изменения емкости:

$$f_c = 1/T_c = n/60, \quad (8)$$

где n – количество оборотов в минуту.

Линейная связь между током и напряженностью позволяет достигать высокой разрешающей способности устройства.

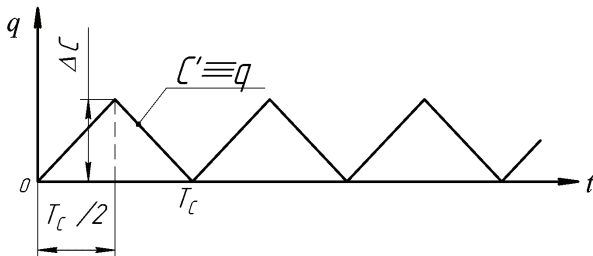


Рисунок 3 – Изменение во времени индуктированного заряда на измерительной пластине роторного вольтметра

В автономной системе мониторинга грозовой активности трудности применения роторного вольтметра для измерения электростатического поля в атмосфере связано с высокой потребляемой мощностью от источника автономного питания и наличием механических частей. Но низкая стоимость и простота конструкции отчасти компенсируют эти недостатки.

Вибрационный вольтметр. В системе металлических электродов с электрическим полем между ними можно изменять емкость за счет периодического изменения пути интегрирования. На этом и основан принцип работы вибрационных вольтметров. Электрод совершает синусоидальные колебания, при этом меняется емкость. При каждом изменении емкости через сопротивление R протекает заряд $\Delta C U$, что дает на частоте колебаний f_c среднее значение тока:

$$i = \frac{dq}{dt} = f_c \Delta C U. \quad (9)$$

Измерения электростатического поля на базе МЭМС технологии. Следующим этапом развития роторного или вибрационного вольтметра является реализация подобных конструкций в микро масштабе. Технология микро электромеханических сенсоров (МЭМС) позволяет разработать вибрационный вольтметр в виде кристалла микросхемы размером 5 x 5 мм. Функциональная схема и внутренняя структура микромеханического электростатического МЭМС вольтметра изображена на рис. 4 и рис. 5 [6].

Эта система использует тот же принцип измерения электростатического поля что и роторный вольтметр – закон электрической индукции [7]. При вибрационном движении подвижной части микромеханической структуры, при воздействии электростатического поля происходит индукция зарядов на поверхность пластины переменного конденсатора который соединен через интерфейсную часть микросхемы со схемой усиления.

Емкостная МЭМС структура продуцирует ток,

который пропорциональный амплитуде и полярности приложенного внешнего электрического поля. Ток усиливается и преобразовывается в напряжение схемой усиления для дальнейшей оцифровки и обработки полученных данных. На рис. 6 представлено изображение реального микро механического вольтметра электростатического поля.

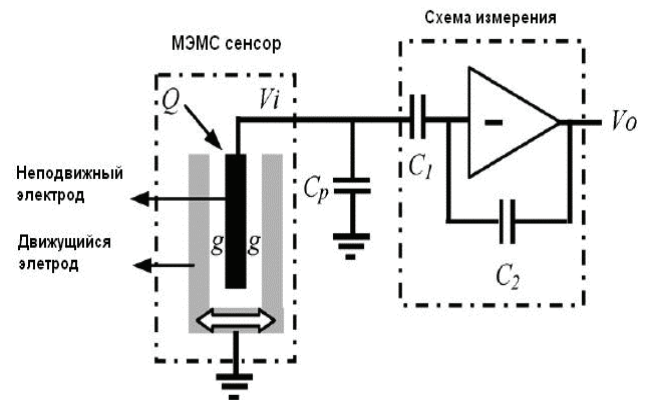


Рисунок 4 – Функциональная схема микромеханического вольтметра

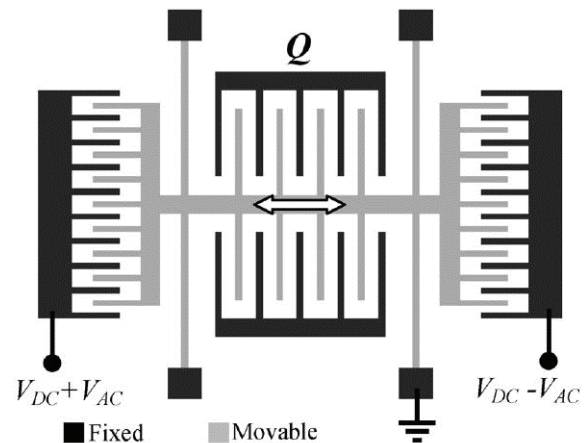


Рисунок 5 – Внутренняя структура микромеханического вольтметра

Вибрация подвижных частей создается путем прикладывания переменного напряжения к актюатору, который создает движущую силу. Для максимальной амплитуды вибрации необходимо, чтобы частота приложенного напряжения соответствовала резонансной частоте актюатора. Частота генерируемого тока на выходе емкостной структуры пропорциональна частоте напряжения приложенного к актюатору.

Данная МЭМС конструкция преобладает рядом преимуществ в отношении к роторным и вибрационным вольтметрам описанным в [2]. Основное достоинство МЭМС вибрационных вольтметров заключается в микронных размерах их конструкции. Это повышает уровень износостойкости микромеханических движущихся частей; снижает энергопотребление, что дает возможность использовать аккумуляторное питание без частой подзарядки, а измерительная часть устройства имеет гораздо меньшие габариты, и представляет собой микросхему в малогабаритном корпусе, а сле-

довательно обладает высокой разрешающей способностью [7].

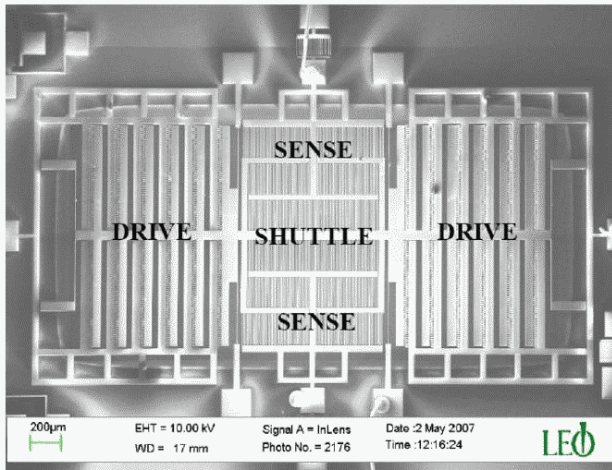


Рисунок 6 – Фото микроскопической структуры реального микромеханического вольтметра

Реализация роторного вольтметра. На рис. 7 представлен внешний вид роторного вольтметра для измерений электростатического поля атмосферы Земли в предгрозовой обстановке. Данная конструкция позволяет производить измерения электрического поля атмосферы Земли напряженностью от 100 В/м и регулированием чувствительности за счет изменения частоты вращения экранирующего электрода. В конструкции роторного вольтметра неподвижный диск и вращающаяся заземленная металлическая крыльчатка установлены соосно и перпендикулярно линиям напряженности электрического поля. Измерительные пластины изготовлены из проводящего материала и изолированы от заземленных поверхностей. Зазор между измерительными пластинами и экранирующим электродом достигает 1 мм. Для увеличения чувствительности роторного вольтметра зазор можно уменьшить. Крыльчатка имеет четыре крыла. Вращаясь, они либо открывают, либо экранируют обкладки от действия электрического поля. Для обеспечения процентной точности измерений необходимо поддерживать скорость вращения крыльчатки не хуже, чем с 20 %-й погрешностью.

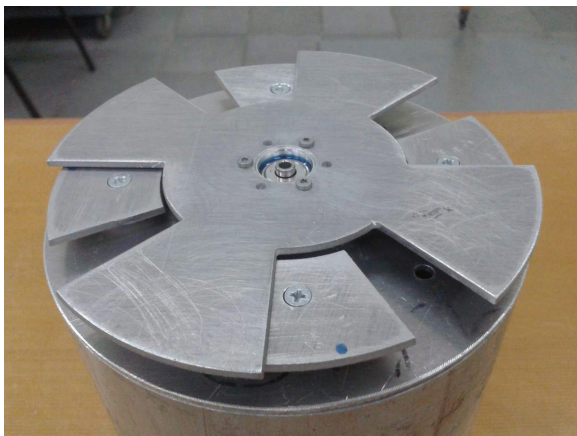


Рисунок 7 – Внешний вид конструкции роторного вольтметра

Роторный вольтметр реализован на основе малогабаритного, высокооборотного, прямоприводного электродвигателя (такие двигатели применяются в приводах винчестерских дисков и в видеомагнитофонах). Его применение позволило разработать вольтметр с малыми размерами.

Выводы. В статье показана возможность локального мониторинга предгрозовой обстановки, определяя вероятность возникновения молниевых разрядов за счет измерения электростатического поля, возникающего между заряженным облаком и землей. Приведен принцип измерения электростатического поля. Описана конструкция роторного и вибрационного вольтметра. Также в статье приведен метод измерения электростатических полей на базе MEMS технологии. На основе проведенного анализа, сделаны следующие выводы. Роторный вольтметр, при его использовании в качестве измерителя электростатического поля атмосферы в предгрозовой обстановке, обладает рядом преимуществ, например низкая стоимость, простота конструкции, регулирование чувствительности. К недостаткам можно отнести следующее: необходимость обслуживания в связи с наличием механических частей конструкции, так как устройство находится под воздействием атмосферных факторов, высокая потребляемая мощность от источника питания. Основные преимущества MEMS технологии для измерения электростатических полей, как развитие вибрационных вольтметров, следующие: высокая чувствительность, износостойкость, низкая потребляемая мощность от источника питания, малогабаритная конструкция. Недостатки: слабая помехоустойчивость к сильным импульсным электромагнитным полям, высокая стоимость. В результате сравнительного анализа преимуществ и недостатков средств измерения электростатического поля, был реализован роторный вольтметр.

Список литературы: 1. Кравченко В. И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства / В. И. Кравченко // Х.: Изд-во «НТМТ», 2010. – С. 22-28. 2. Бейер М. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / М. Бейер, В. Бек, К. Меллер, В. М. Цангль // Энергоатомиздат, 1989. – С. 438-441. 3. Кириллов В. Ю. Технические средства испытаний электромагнитной совместимости: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – С. 29-31. 4. Henderson J. E. The Use of the Rotary Voltmeter for Measurements up to 830 kilovolts / J. E. Henderson, W. H. Goss, J. E. Rose // Review of Scientific Instruments. – 1992. – Vol. 6. – P. 63–65. 5. Куксанов Н. К. Малогабаритный роторный вольтметр, используемый в системах измерения и стабилизации ускоряющего промышленных ускорителей электронов / Н. К. Куксанов, П. И. Немытов, Ю. И. Голубенко // Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 2010. 6. Bhattacharyya B. Electrochemical Micromachining for Nanofabrication, MEMS and Nanotechnology, 1st Edition / B. Bhattacharyya / Production Engineering Department, Jadavpur University, Kolkata, 2015. 7. Riehl P. S. High-resolution electrometer with micromechanical variable capacitor solidstate sensor / P. S. Riehl, K. L. Scott, R. S. Muller, R. T. Howe // Proc. Actuator and Microsystem Workshop. – 2002. – P. 305–308. 8. Zhaoying Z. Microsystems and nanotechnology / Z. Zhaoying, W. Zhonglin, L. Liwei // Tsinghua University Press. – Beijing and Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012. – P. 221-228.

Bibliography (transliterated): 1. Kravchenko V. I. Molniya. Elektromagnitnyye faktory i ih porazhayushee vozdeystvie na tehicheskoye sredstva. Kravchenko V. I. Kharkiv: Izd-vo «NTMT». 2010. 22-28 Print.

2. Bejer M. Tehnika vysokih naprjazenij: teoreticheskie i prakticheskie osnovy primenenija. Bejer M., Bjok V., Mjoller K., Caengl' V M. Jenergoatomizdat, 1989. 438-441 Print. 3. Kirillov V. Ju. Tehnicheskie sredstva ispytanij jelektromagnitnoj sovmestivosti: Uchebnoe posobie. Moscow: Izd-vo MAI, 2007. 29-31 Print. 4. Henderson J. E. The Use of the Rotary Voltmeter for Measurements up to 830 kilovolts. Henderson J. E., Goss W. H., Rose J. E. Review of Scientific Instruments. 1992. Vol. 6. 63-65 Print. 5. Kuksanov N. K. Malogabaritnyj rotornyj vol'tmetr, ispol'zuemij v sistemah izmerenija i stabilizacii uskorjajushhego promyshlennyh uskoritelej jelektronov. N. K. Kuksanov, P. I. Nemytov, Ju. I. Golubenko. Institut jadernoj fiziki im. G. I. Budkera SO RAN, 2010

Print. 6. Bhattacharyya B. Electrochemical Micromachining for Nanofabrication, MEMS and Nanotechnology, 1st Edition. Bhattacharyya B. Production Engineering Department, Jadavpur University, Kolkata, 2015 Print. 7. Riehl P. S. High-resolution electrometer with micromechanical variable capacitor solidstate sensor. Riehl P. S., Scott K. L., Muller R. S., and Howe R. T. Proc. Actuator and Microsystem Workshop, 2002. 305-308 Print. 8. Zhaoying Z. Microsystems and nanotechnology. Zhaoying Z., Zhonglin W., Liwei L. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012. 221-228 Print.

Поступила (received) 8.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Постельник Игорь Александрович, Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт «Молния», аспирант; тел.: (097) 166-33-59; email: gor132@i.ua.

Postilnyk Igor Aleksandrovich, Scientific Research & Design Institute «Molnia», postgraduate student; tel.: (097) 166-33-59; email: gor132@i.ua.

Шаламов Станислав Павлович, Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт «Молния», инженер; тел.: (066) 62-60-187; email: shalamov.stas@mail.ru.

Shalamov Stanislav Pavlovych, Scientific Research & Design Institute «Molnia», engineer; tel.: (066) 62-60-187; email: shalamov.stas@mail.ru

УДК 621.317.39.084.2

В. В. РУДАКОВ, А. А. КОРОБКО

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ВИДЕ СТУПЕНЧАТОГО КОАКСИАЛЬНОГО НЕОДНОРОДНОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ДИЭЛЬКОМЕТРИИ ЖИДКИХ СРЕД В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

Проведены исследования электромагнитных процессов в ступенчатом неоднородном коаксиальном резонаторе. Исследования проведены для случая идеальных линий, по которым распространяется исключительно электромагнитные волны Т-типа. Получено обобщенное выражение для спектра резонансных частот, которое позволяет определить частоты резонанса при любых сочетаниях геометрических параметров и электрических характеристик элементов резонатора. Усовершенствована конструкция резонатора с целью получения минимального значения первой резонансной частоты при его минимальных размерах. Получено точное выражение для первой резонансной частоты исследуемого резонатора. Показано полное совпадение результатов исследований с полученными ранее результатами имитационного моделирования. Определена метрологическая характеристика резонатора – зависимость частоты первого резонанса от диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости, что позволяет применять его для диэлькометрии жидких сред в СВЧ диапазоне.

Ключевые слова: ступенчатый неоднородный резонатор, электромагнитные волны Т-типа, резонанс, спектр, резонансная частота, волновое сопротивление, диэлектрическая проницаемость.

Введение. Необходимость проведения диэлькометрических измерений жидких сред в СВЧ диапазоне обусловлена расширением номенклатуры жидких сред, для которых актуально определение влагосодержания.

Одним из методов измерений влагосодержания в жидких средах является диэлькометрический метод, суть которого заключается в измерении диэлектрической проницаемости исследуемой обводненной жидкости и сравнения этой величины с диэлектрической проницаемостью обезвоженной жидкости.

Разность этих диэлектрических проницаемостей, которая характеризует влагосодержание исследуемой жидкости, увеличивается как при увеличении влагосодержания, так и при увеличении разности диэлектрических проницаемостей самой обезвоженной жидкости и воды. Диэлектрическая проницаемость воды есть величина постоянная, что приводит к тому, что

чувствительность диэлькометрического метода при использовании низких частот радиодиапазона (до 3МГц) [1] максимальна при измерениях этим методом влагосодержания неполярных жидких сред.

В случае применения диэлькометрического метода на низких частотах для измерения влагосодержания полярных жидкостей его чувствительность резко уменьшается из-за уменьшения разницы диэлектрических проницаемостей исследуемой полярной жидкости и воды.

Расширение области применения диэлькометрического метода измерения влагосодержания на полярные жидкости требует перехода частот измерения в области СВЧ диапазона.

При этом частота измерений выбирается из следующих соображений. Максимальное значение частоты измерений ограничено дисперсионными свойствами воды как диэлектрика. Эти частота составляет ве-

личину до 2 ГГц (относительная диэлектрическая проницаемость ϵ воды на этой частоте очень незначительно отличается от величины $\epsilon = 81$, соответствующей низкочастотному радиодиапазону).

С другой стороны, на частоте измерений полярная жидкость должна иметь диэлектрические характеристики неполярной ($\epsilon \leq 3$), то есть должны проявляться инерционные эффекты ее поляризации.

Для большинства полярных жидкостей эта частота составляет величину $\approx 10 \dots 200$ МГц.

На этих частотах измерительные преобразователи (ИП) для диэлькометрии с сосредоточенными параметрами имеют большие значения паразитных параметров, что делает их совершенно непригодными. Единственным выходом является применение ИП с распределенными параметрами. Но геометрические размеры традиционных ИП с распределенными параметрами (например, четвертьволнового резонатора) слишком велики для использования в указанном диапазоне частот. Именно задача разработки и исследования ИП с распределенными параметрами с уменьшенными размерами является первоочередной для реализации диэлькометрического метода измерения влагосодержания полярных жидких сред в СВЧ диапазоне.

В работе [2] было предложено использовать в качестве ИП ступенчатый неоднородный коаксиальный резонатор (СНКР), исследованию характеристик которого посвящается данная работа.

Анализ предварительных исследований и литературы. Электромагнитным процессам и определению основных характеристик неоднородных резонаторов на отрезках регулярных линий передачи посвящено достаточно большое количество работ [3-13]. В этих работах был проведен теоретический анализ электромагнитных процессов в неоднородных резонаторах на основе нерегулярных линий коаксиального типа, а также освещены вопросы их инженерного расчета.

Вышеперечисленные работы ориентированы, в основном, на выполнение основных требований к резонансным системам, которые работают в радиотехнических устройствах генерации, передачи и приема электромагнитных колебаний [14]:

- частотная диапазонность;
- высокие значения добротности;
- хорошие фильтрующие свойства;
- высокая надежность и т.д.

В работе [2] были исследованы характеристики СНКР методом имитационного моделирования в среде MicroCap 8.

Полученные результаты позволили считать целесообразным использование СНКР в качестве ИП для целей определения диэлектрической проницаемости жидких сред в СВЧ диапазоне в силу выявленных преимуществ ИП в виде СНКР перед другими типами ИП:

- нулевые значения «слепой» емкости;
- существенное уменьшение первой резонансной частоты;
- существенное увеличение разброса частот пер-

вого и последующих резонансов.

Однако, имитационный метод дает численные решение и не позволяет провести оптимизацию СНКР, а также определить аналитическую зависимость основной метрологической характеристики СНКР для задач диэлькометрии – зависимость частоты от диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости.

Цель работы – определение основной метрологической характеристики СНКР: зависимость его резонансной частоты от диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости, а также анализ применимости СНКР в качестве ИП для целей диэлькометрии жидких сред.

Методика исследований. В работе исследовался СНКР, типовое конструктивное исполнение которого представлено на рис 1.

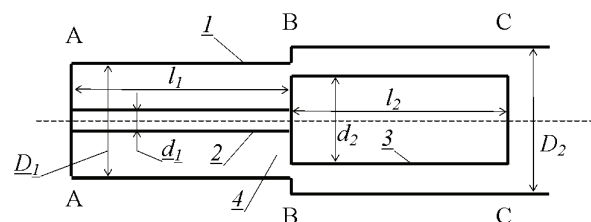


Рисунок 1 – Конструктивное исполнение ИП на базе СНКР в обобщенном виде: 1 – внешний цилиндрический электрод; 2 – внутренний электрод высокоимпедансной коаксиальной линии; 3 – внутренний электрод низкоимпедансной коаксиальной линии; 4 – исследуемая диэлектрическая среда

Конструкция СНКР представляет собой коаксиальную конструкцию из двух отрезков линий с различными волновыми сопротивлениями. Линия с максимальным волновым сопротивлением образована наружным электродом 1 и внутренним электродом 2, закорочена с одной стороны и нагружена на линию с минимальным волновым сопротивлением, образованную электродами 1 и 3 и работающую в режиме холостого хода. Между наружным и внутренними электродами находится исследуемая жидкость с неизвестной относительной диэлектрической проницаемостью ϵ .

Схема замещения для анализа ИП в виде СНКР приведена на рис.2.

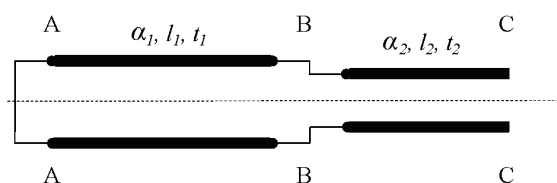


Рисунок 2 – Обобщенная схема замещения СНКР: Z_1, Z_2 – волновое сопротивление; l_1, l_2 – геометрические длины; t_1, t_2 – времена пробега по линиям 1 и 2 соответственно

Волновые сопротивления линий 1 и 2 определяются следующими соотношениями соответственно:

$$Z_1 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} 60 \ln \left(\frac{D_1}{d_1} \right); \quad Z_2 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} 60 \ln \left(\frac{D_2}{d_2} \right), \quad (1)$$

где D_1, D_2 – диаметры внешнего электрода; d_1, d_2 –

диаметры внутреннего электрода.

Геометрические длины линий l_1 и l_2 связаны со временами распространения t_1, t_2 соответственно:

$$t_{1,2} = \frac{l_{1,2}}{c\sqrt{\varepsilon}}, \quad (2)$$

где c – скорость света.

Анализ метрологических характеристик был проведен на основе рассмотрения характеристик линий на участках А – В и В – С, а также стыка линий по сечению В – В.

В процессе анализа были сделаны следующие допущения:

- линии 1 и 2 идеальны и не имеют потерь;
- в линиях 1 и 2 основным типом волны является плоская Т волна.

Анализ показывает, что место стыка линий по сечению В – В есть место соединения регулярной короткозамкнутой линии 1 и регулярной разомкнутой на конце линии 2.

Входные сопротивления Z_K и Z_X этих идеальных линий чисто реактивные и определяются следующими соотношениями [11]:

$$Z_K = jZ_1 \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right); \quad (3)$$

$$Z_X = -jZ_2 \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi l_2}{\lambda}\right), \quad (4)$$

где $j = \sqrt{-1}$; λ – длина волны; Z_K – входное сопротивление линии 1 (короткозамкнута на конце); Z_X – входное сопротивление линии 2 (разомкнута на конце).

При резонансе $Z_K + Z_X = 0$, что приводит к следующему соотношению:

$$Z_1 \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right) = Z_2 \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi l_2}{\lambda}\right). \quad (5)$$

Значение Z_1, Z_2 и l_1, l_2 целиком определяются конструкцией ИП в виде СНКР, значение λ неизвестно.

При $Z_2 = mZ_1$ ($0 < m < 1$) и $l_2 = nl_1$ ($n > 0$) соотношение (5) принимает следующий вид:

$$Z_1 \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right) = mZ_1 \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi l_1 n}{\lambda}\right). \quad (6)$$

Уравнение (6) относительно λ не имеет точных аналитических решений, поэтому дальнейший анализ оптимальных величин Z_1, m , и n был проведен исходя из того, что Z_K в выражении (3) представляет собой реактивный импеданс некой эквивалентной индуктивности $L_{\mathcal{O}}$, а Z_X в выражении (4) представляет реактивный импеданс некой эквивалентной емкости $C_{\mathcal{O}}$.

То есть:

$$j\omega L_{\mathcal{O}} = Z_K = jZ_1 \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right); \quad (7)$$

$$\frac{1}{j\omega C_{\mathcal{O}}} = Z_X = -jZ_2 \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi l_2}{\lambda}\right), \quad (8)$$

где ω – циклическая частота ($\omega = 2\pi c/\lambda$).

При этом

$$L_{\mathcal{O}} = \frac{Z_1 \cdot \lambda \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right)}{2\pi c}; \quad (9)$$

$$C_{\mathcal{O}} = \frac{\lambda \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1 n}{\lambda}\right)}{2\pi c Z_1 m}. \quad (10)$$

Задача конструирования ИП на основе СНКР – это сочетание максимальной величины λ и минимальной величины ($l_1 + l_2$) в выражении (6).

Максимальной величине λ (минимальной частоте резонанса f) соответствует максимальная величина произведения $L_{\mathcal{O}}$ и $C_{\mathcal{O}}$ при фиксированных значениях m .

То есть

$$L_{\mathcal{O}} C_{\mathcal{O}} \sim \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1 n}{\lambda}\right). \quad (11)$$

Анализ выражения (11) относительно величины n показывает, что $L_{\mathcal{O}} \cdot C_{\mathcal{O}}$ имеет максимум при $n = 1$, то есть при одинаковой длине линий ($l_1 = l_2$).

Подставляя оптимальное значение $n = 1$ в выражение (6) можно определить частоту первого (основного) резонанса СНКР:

$$f = \frac{c \cdot \operatorname{arctg}\sqrt{m}}{2\pi\sqrt{\varepsilon} \cdot l_1}. \quad (12)$$

Формула (12) – это выражение, описывающее основную метрологическую характеристику ИП в виде СНКР: зависимость частоты основного (первого) резонанса f от относительной диэлектрической проницаемости ε исследуемой жидкости.

Анализ этого выражения показывает, что при фиксированных значениях $l_1 = l_2$ (минимизация ИП) максимальный вклад в уменьшение величины f дает значение $m = Z_2/Z_1$.

Значение величин частот первого резонанса из выражения (12) было сопоставлено с результатами, полученными методом имитационного моделирования из работы [2] при $t_1 = t_2 = 1$ нс; $\varepsilon = 1$.

Результаты сопоставления приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения первых резонансных частот для различных Z_1, Z_2 .

№ п/п	Z_1/Z_2 , Ом	Первая резонансная частота ИП [1]/ формула (12), ГГц
1	50/50	0,125/0,125
2	50/120	0,09/0,0897
3	125/50	0,09/0,0897
4	50/10	0,067/0,0669
5	250/50	0,067/0,0669
6	250/10	0,031/0,03141

Сопоставление полученных значений частот показывает, что полученные результаты практически совпадают, небольшое их отличие обусловлено ограниченной точностью имитационного моделирования в среде MicroCap 8.

Дополнительной проверкой формулы (12) является случай $n = 1, m = 1$ (классический четвертьволновой резонатор).

Как видно из строки 1 табл. 1, формула (12) рабо-

тает точно и в этом случае.

Частоты резонансов более высокого порядка могут определяться из соотношения (6), так как формула (12) справедлива только для частоты первого резонанса.

В табл. 2 приведены сравнительные данные по резонансным частотам с номерами 2-8, полученные средствами имитационного моделирования [2] и из соотношения (6).

Сопоставление данных имитационного моделирования и расчетных данных показывает их полное совпадение.

Дополнительно проверкой является случай $Z_1 = Z_2$; $n = 1$; $m = 1$ (классически четвертьволновой резонатор), при котором также наблюдается полное совпадение результатов.

Как уже отмечено выше, данный анализ и его результаты справедливы только для случая Т – приближения, то есть тогда когда поперечные размеры СНКР существенно меньше длины волны колебаний в нем. Для случая, когда длина волны колебаний в СНКР становится соизмеримой с его поперечными размерами, данный подход является некорректным.

Таблица 2 – Распределение резонансных частот.

Номер резонанса	Частоты резонансов: имитационное моделирование / расчет по (6), ГГц					
	Z_1/Z_2 , Ом					
	50/50	50/20	125/50	50/10	250/50	250/10
2	0,374/ 0,374	0,41/ 0,41	0,408/ 0,408	0,432/ 0,432	0,482/ 0,482	0,462/ 0,462
3	0,623/ 0,623	0,588/ 0,588	0,584/ 0,584	0,565/ 0,565	0,556/ 0,556	0,542/ 0,542
4	0,868/ 0,868	0,903/ 0,903	0,887/ 0,887	0,925/ 0,925	0,859/ 0,859	0,873/ 0,873
5	1,111/ 1,111	1,078/ 1,078	1,054/ 1,054	1,05/ 1,05	1,011/ 1,011	1,003/ 1,003
6	1,352/ 1,352	1,383/ 1,383	1,328/ 1,328	1,404/ 1,404	1,252/ 1,252	1,253/ 1,253
7	1,591/ 1,591	1,56/ 1,56	1,523/ 1,523	1,541/ 1,541	1,489/ 1,489	1,5/1,5
8	1,831/ 1,831	1,86/ 1,86	1,779/ 1,779	1,877/ 1,877	1,743/ 1,743	1,742/ 1,742

В этом случае в СНКР будут распространяться волны высших типов (Е- и Н-типов), критические частоты которых соответственно равны [5]:

$$f_E = \frac{2c}{\pi(D_{1,2} + d_{1,2})\sqrt{\epsilon}}; \quad (13)$$

$$f_H = \frac{c}{(D_{1,2} - d_{1,2})\sqrt{\epsilon}}. \quad (14)$$

Следовательно полученные результаты корректны для частот, которые существенно меньше критических (13) и (14) для конкретного СНКР.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Получено соотношение, описывающее весь спектр резонансных частот в зависимости от волновых сопротивлений длин составных частей и диэлектрической проницаемости среды.

2. Рассмотренная конструкция ИП ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора эффективна для получения минимального значения частоты первого резонанса при заданных минимальных размерах ИП.

3. Получено точное аналитическое выражение для частоты первого резонанса оптимизированного ИП.

4. Проведенное сравнение аналитических результатов, полученных в данной работе с результатами имитационного моделирования, полученными ранее, показало их полное совпадение и корректность полученных результатов.

5. Полученные результаты дают основания для применения СНКР в виде ИП для диэлькометрии жидких сред в диапазоне СВЧ.

Список литературы: 1. Рудаков В.В. Диэлектрический метод определения влагосодержания в эмульсиях типа минеральное масло – вода с использованием электрофизической модели эмульсии инженерного типа / В.В.Рудаков, А.И.Коробко, Коробко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2009. – № 39. – С. 154-158. 2. Рудаков В.В. Резонансные спектры неоднородных коаксиальных резонаторов для определения диэлектрической проницаемости жидких сред в СВЧ диапазоне / В.В.Рудаков, А.А.Коробко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20. – С.129-137. 3. Радионов А.А. Резонаторы на основе отрезков продольно-нерегулярных волноводов / А.А.Радионов, Л.Г.Рудоюсова // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – 1996. – № 2. – С.58. 4. Joly R. Wide band cavity tuned G a As FET oscillators / R.Joly // IEEE MTT-S International microwave symposium. Digest. – Los Angeles. – June 1981. – P. 70-78. 5. Whinnery J.R. Coaxial-line discontinuities Proc / J.R.Whinnery, H.W.Jamieson, J.E.Robbins // IRE. – Vol. 32. – 1944. – P. 695-709. 6. Козловский В.В. Схемы резонаторов на отрезках неоднородных линий, имеющих одинаковые резонансные частоты / В.В.Козловский // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т.20, № 2. 7. Somlo P.I. The computation of coaxial line step capacitances / P.I.Somlo // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1967. – Vol. MTT-15, vol. 1. 8. Stracca G.B. Unloaded Q-factor of stepped-impedance resonators / G.B.Stracca, A.Panzeri // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1986. – Vol. MTT-34, vol. 1. 9. Бородаев В.А. Инженерный расчет ступенчатых коаксиальных резонаторов / В.А.Бородаев и др. // Радиотехника. – 1990. – № 12. – С. 89-91. 10. Рыжаков С.М. Ступенчатый резонатор / С.М. Рыжаков, Т.С.Рыжакова // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – 1999. – Т. 7, № 2. – С. 181-182. 11. Захаров А.В. Входные функции отрезков неоднородных линий / А.В.Захаров // Радиотехника и электроника. – 1985. – Т. 30, № 7. – С. 1373-1380. 12. Hameg G. Glass cavity resonators for low microwave frequencies / G. Hameg // Electron. Lett. – 1995. – Vol. 31. № 10. – P. 811-812. 13. Рыжаков С.М. Ступенчатый резонатор СВЧ диапазона / С.М.Рыжаков, Т.С.Рыжакова // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 1998. – Т. 1, № 2-3. – С. 49-51. 14. Рыжакова Т.С. Расчет и исследование СВЧ резонаторов на основе цилиндрических ступенчатых структур: дис. к-та тех. наук. / Т.С.Рыжакова. – Ниж. Нов. 2002. – 129 С.

Bibliography (transliterated): 1. Rudakov V.V., Korobko A.I., Korobko A.A. "Dielektricheskiy metod opredeleniya vlagosoderzhaniya v emul'siyakh tipa mineral'noye maslo – voda s ispol'zovaniyem yelektrofizicheskoy modeli emul'sii inzhenernogo tipa" // Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «Kharkiv's'kiy politekhnichniy institut». Zbirknik naukovikh prats'. Tematichniy vipusk: Tekhnika i yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU «KHP». 2009. No 39. 154-158. Print. 2. Rudakov V.V., Korobko A.A. Rezonansnye spektry neodnorodnykh koaksial'nykh rezonatorov dlja opredelenija dijelektricheskoy pronaemosti zhidkikh sred v SVCh diapazone. Visnik NTU "HP". Zbirknik naukovikh prac'. Tematichnij vipusk: Tekhnika i yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU "HP", 2015. No 20. 129-137. Print. 3. Radionov A.A., Rudojasova L.G. Rezonatory na osnove otrezkov prodol'no-nereguljarnykh volnovodov. Jelektrodinamika i tehnik SVCh i KVCh., 1996. No 2. 58. Print. 4. Joly R. Wide band cavity tuned G a As

FET oscillators. IEEE MTT-S International microwave symposium. Digest. Los Angeles. June 1981. 70-78. Print. **5**. Whinnery J.R., Jamieson H.W., Robbins J.E. Coaxial-line discontinuities Proc. IRE. Vol.32. 1944. 695-709. Print. **6**. Kozlovskij V.V. Shemy rezonatorov na otrezkah neodnorodnyh linij, imejushihh odinakovyh rezonansnyh chastoty. Radiotekhnika i jelektronika. Vol. 20, No 2. 1975. Print. **7**. Somlo P.I. The computation of coaxial line step capacitances. IEEE Transactions on microwave theory and techniques. Vol. MTT-15. vol. 1. 1967. Print. **8**. Stracca G.B., Panzeri A. Unloaded Q-factor of stepped-impedance resonators. IEEE Transactions on microwave theory and techniques. Vol. MTT-34, vol. 1. 1986. Print. **9**. Borodaev V.A. i dr. Inzhenernyj raschet stupenchatyh koaksial'nyh rezonatorov. Radiotekhnika. No 12, 1990. 89-

91. Print. **10**. Ryzhakov S.M., Ryzhakova T.S. Stupenchatyj rezonator. Jelektrodinamika i tehnika SVCh i KVCh. 1999. Vol. 7. No 2. 181-182. Print. **11**. Zaharov A.V. Vhodnye funkcii otrezkov neodnorodnyh linij. Radiotekhnika i jelektronika. Vol. 30. 1985. No 7. 1373-1380. Print. **12**. Nateg G. Glass cavity resonators for low microwave frequencies. Electron. Lett, 1995. 31, No 10. 811-812. Print. **13**. Ryzhakov S.M., Ryzhakova T.S. Stupenchatyj rezonator SVCh diapazona. Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. Vol. 1. No 2-3. 1998. 49-51. Print. **14**. Ryzhakova T.S. Raschet i issledovanie SVCh rezonatorov na osnove cilindricheskih stupenchatyh struktur.: dis. k-ta teh. nauk. Nizh. Nov. 2002. 129. Print.

Поступила (received) 26.06.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рудаков Валерій Васильевич, Национальный технический университет «ХПИ», доктор технических наук, профессор; тел.: (050) 533-79-31; e-mail: valrudakov@kpi.kharkov.ua.

Rudakov Valeriy Vasilyevich, National Technical University "KhPI", Doctor of Technical Science, professor; tel.: (050) 533-79-31; e-mail: valrudakov@kpi.kharkov.ua.

Коробко Александр Анатольевич, Национальный технический университет «ХПИ», аспирант; тел.: (093) 650-80-88; email: bigmenworld@gmail.com.

Korobko Aleksandr Anatolievich, National Technical University "KhPI", Postgraduate Student; tel.: (093) 650-80-88; email: bigmenworld@gmail.com.

УДК 621.391 : 51(075)

А. А. СЕРКОВ, С. А. НИКИТИН, В. И. КРАВЧЕНКО В. В. КНЯЗЕВ

СИСТЕМА РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ГРОЗОВОЙ ОПАСНОСТИ

Систематический контроль над состоянием и тенденциями развития грозовой активности определенного региона обусловлен необходимостью минимизации ущерба, наносимого разрядами молнии. При этом особое внимание уделяется достоверности прогноза грозовой активности и времени его формирования. Так малый временной диапазон между формированием достоверного прогноза о грозовой опасности и наступлением неблагоприятных событий не позволяет своевременно принять меры по минимизации наносимого ущерба. Особое внимание уделено достоверности формируемого прогноза. Таким образом, неразрывное сочетание и реализация этих требований позволяет решить задачу оптимального синтеза системы раннего предупреждения грозовой опасности (РПГО).

Ключевые слова: мониторинг грозовой опасности; разряд молнии; интеллектуальный анализ данных; визуализация; автономный модуль.

Введение. В начальной стадии развития грозовых явлений внутриоблачные разряды носят мелко-масштабный характер. При этом длительность пакета импульсов составляет 10–15 мс. с частотой следования 3–4 импульса в минуту. По мере развития конвективного облака происходит постепенный рост плотности объемных зарядов и усиление грозовой активности. Продолжительность предгрозового состояния по времени может достигать 16 минут, со средним значением 8 минут [1, 2]. В 75 % случаев продолжительность предгрозового состояния облака находится в интервале от 3 до 10 минут. И если за 14–16 минут облако не переходит в грозовое состояние, то оно, как правило, распадается [3]. Таким образом, регистрация и идентификация межоблачных разрядов позволяет обеспечить временной интервал в 10 мин. до первого опасного разряда типа «облако-земля», что дает возможность реализовать систему раннего предупреждения о грозовой опасности.

Постановка проблемы. Повышение достоверно-

сти прогноза грозовой опасности требует обработки разнородной информации, отличающейся как по форме, так и содержанию. Обычно такие данные поступают в результате съема оперативной информации о результатах инструментальных измерений с последующей ее обработкой в реальном масштабе времени. При этом осуществляют пространственную привязку получаемых данных, что обеспечивает полноту, наглядность и оперативность их представления. Сопряжение разнородной информации из одного или нескольких однотипных / разнотипных источников в каждой точке заданного региона является исходным массивом данных и начальным этапом комплексного анализа информации, в котором применимы различные методы математической обработки данных. Формальная постановка задачи оптимального синтеза системы РПГО заключается в том, что необходимо найти такой вектор параметров \vec{z}_{opt} , при котором

$$\vec{z}_{opt} = \underset{\vec{z} \in Z_{don}}{extr} E(\vec{z})$$

при

$$\vec{y}(\vec{z}) \in Y_{oon},$$

где \vec{z}_{opt} – вектор параметров системы; Z_{oon} – множество допустимых значений параметров; $E(\vec{z})$ – критерий эффективности системы, экстремум которого необходимо обеспечить выбором соответствующего вектора параметров; $\vec{y}(\vec{z})$ – вектор показателей качества системы; Y_{oon} – множество допустимых значений показателей качества.

Целью работы является разработка системы раннего предупреждения грозовой опасности.

Результаты. В случае представления системы в виде совокупности независимых блоков, решение многомерной задачи сводится к решению нескольких одномерных задач. Однако использование распределенного программного обеспечения в системе РПГО делает данный подход неприемлемым. Это обусловлено наличием сильных взаимных влияний подсистем, а также зависимостью характеристик одних подсистем от параметров других. Таким образом, следует выявлять функциональные зависимости критерия эффективности и показателей качества системы от технических параметров всех ее подсистем. Причем, задачу оптимального параметрического синтеза системы РПГО следует решать как многомерную задачу, что требует разработки соответствующих методов. Общая схема разработанной системы РПГО представлена на рис. 1.

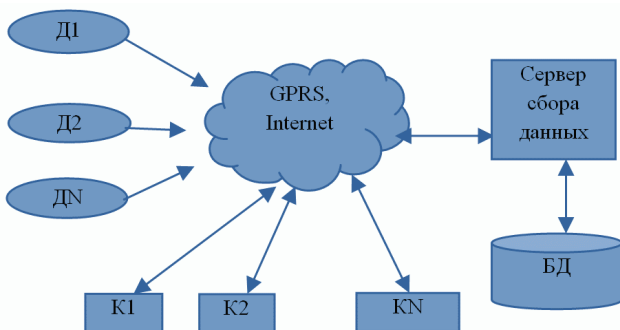


Рисунок 1 – Общая схема системы РПГО

Для этого разработан автономный модуль (рис. 2) сбора, предварительной обработки и передачи информации. Устройство содержит два емкостных датчика разрядов и электростатический датчик, сигналы с которых поступают на вход АЦП микроконтроллера.

Импульсное электрическое поле межоблачных разрядов имеет горизонтальную поляризацию. По этому признаку и осуществляется их идентификация из общей массы разрядов. Дополнительным признаком является определение градиента электростатического поля в период предгрозовой активности, а началом отсчета является идентифицированный межоблачный разряд. Микроконтроллер STM32F301 с ядром ARM Cortex M4 блока предварительной обработки информации осуществляет оцифровку сигналов, поступающих с датчиков, формирует и отправляет на

сервер информационный пакет, в котором дополнительно вводится информация о его местоположении, уровне заряда батареи и времени отправки пакета.

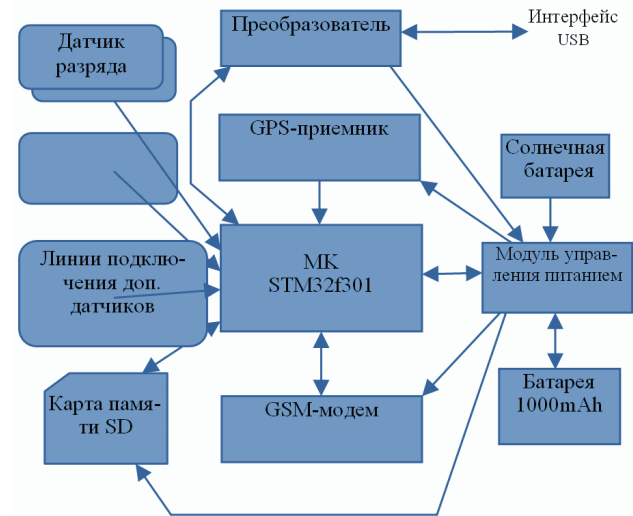


Рисунок 2 – Общая схема автономного модуля

Микроконтроллер работает на частоте 72 МГц. Синхронизация точного времени и определение местоположения автономного модуля осуществляется с помощью встроенного приемника GPS, оснащенного пассивной твердотельной керамической патч-антенной [4]. Для хранения настроек и протокола работы в модуле предусмотрена энергонезависимая карта памяти объемом до 32Гб стандарта Secure Digital. Автономная работа модуля обеспечена встроенной литий-ионной батареей, подзарядка которой осуществляется посредством солнечных батарей, размещенных на корпусе модуля. Созданный прототип автономного модуля на основе разработанной модели [4, 5] в процессе опытной эксплуатации подтвердил его ожидаемые технические характеристики.

В связи с тем, что система РПГО предназначена для работы в сложной электромагнитной обстановке, обусловленной грозовой деятельностью, она должна быть помехоустойчива. Причем, помехоустойчивость системы в основном определяется помехоустойчивостью канала связи. Передача информации от каждого из автономных модулей на сервер сбора хранения и интеллектуального анализа осуществляется с помощью системы мобильной связи стандарта DECT (Digital European Cordless Telecommunications) [6–10]. Передача связи в стандарте DECT – это механизм ухода от каналов, подверженных воздействию помех или каналов с низким уровнем сигнала. При этом за счет динамического выбора канала в каждый момент времени доступен любой из 120 дуплексных каналов. Пороговое отношение сигнал/помеха задано равным 10 дБ, исходя из вероятности ошибки $\bar{P}_{ош} = 10^{-3}$. Реализация стандарта предусматривает процесс постоянного сканирования доступных каналов и измерения уровня помех в них (Received Signal Strength Indication, RSSI). Мощность помех в каналах измеряется не реже, чем 1 раз в 30 с. Благодаря этому осуществляется вы-

бор наилучшего на текущий момент времени канала для передачи информации и реализация динамического выбора, исходя из оценки качества передачи информации. За счет динамического выбора и выделения канала автономный модуль может уходить от соединения, содержащего помехи, организуя второе соединение. Причем, это соединение осуществляется либо с той же базовой станцией, либо с другой. Два радиосоединения временно поддерживаются параллельно. По прошествии некоторого времени базовая станция определяет, у какого соединения лучшее качество и освобождает другой канал. Каналы с наибольшим значением уровня помех постоянно анализируются в автономном модуле с целью выявления принадлежности сигнала конкретной базовой станции и организации связи с ней. Механизм динамического выбора и выделения канала гарантирует, что связь всегда устанавливается в наиболее защищенном от помех доступном канале. Таким образом, снижается вероятность потери информации и повышается достоверность прогноза.

Территориальное размещение автономных модулей осуществлено таким образом, что их зоны покрытия частично перекрываются и совпадают с зоной обслуживания базовой станции. Причем место размещения каждого конкретного модуля выбирают с учетом влияния на них окружающих сооружений и конструкций, вызывающих искажения реальных электростатических полей в месте его установки. Оценку конкретного влияния окружающих сооружений на электромагнитную обстановку в месте расположения автономного модуля осуществляют с помощью разработанного специализированного программного обеспечения [11]. Полученные данные позволяют вносить соответствующие коррективы в результаты измерения и повышать их достоверность. Информация с каждого модуля поступает на сервер сбора, интеллектуального анализа данных и хранения полученных результатов. Он реализован в виде WEB – сервера. Основной модуль сервера написан на языке PHP. Хранение данных осуществляется в базе данных под управлением СУБД MySQL. Программный модуль интеллектуального анализа и визуализации результатов анализа также выполнен на языке PHP. Модуль дает возможность представлять данные о текущей электростатической обстановке выбранного региона с наложением информации на географическую карту местности (рис. 3).

При этом осуществляется прогноз направления распространения грозового фронта с определением места и времени вероятного грозового разряда «облако-земля». Расширены возможности просмотра текущего состояния (рис. 4) и ретроспективной информации (рис. 5) по каждому из автономных модулей сбора и предварительной обработки информации.

Предусмотрена система воссоздания осциллограмм процессов грозовых разрядов. С этой целью автономные модули, регистрирующие процессы изменения электрических полей во время грозового разряда, передают на сервер не видеоимпульс процесса, а его характерные параметры. Это амплитуда и длительность электрического поля разряда – две цифры.

Амплитуда электрического разряда оказывает определяющее влияние на восстанавливаемую деградацию элементной базы радиоэлектронной аппаратуры – зенеровский пробой. А его длительность определяет невозможность восстанавливаемую деградацию – тепловой пробой. Эти два критерия передаются на сервер в блок интеллектуального анализа данных. При этом используется предварительно заполненная база видеоданных о существующих грозовых процессах. По полученным критериям выбирается наиболее близкий процесс, который визуализируется. Такой подход позволил существенно разгрузить радиоканал связи между автономными модулями и базовыми станциями мобильной связи.

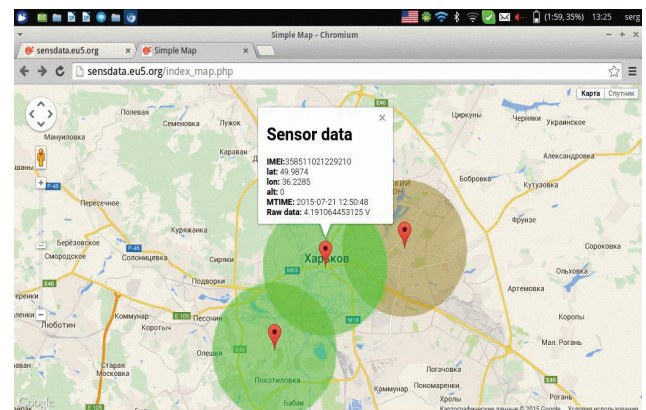


Рисунок 3 – Визуализация электростатической обстановки

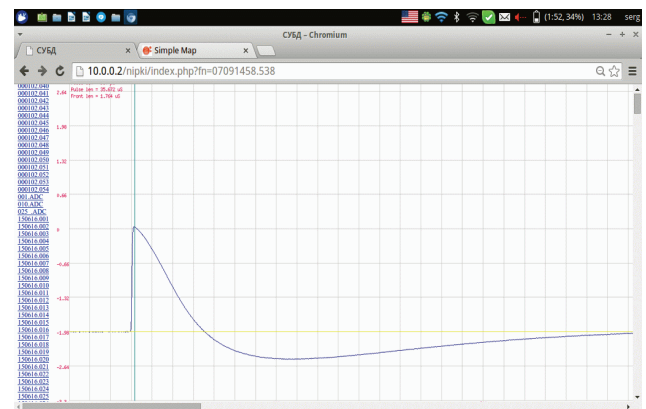


Рисунок 4 – Просмотр осциллограмм разрядов

Оптимальность принятых решений обычно оценивается с помощью критерия эффективности. Наиболее часто в качестве критерия эффективности используются критерий экономической эффективности, например, капитальные вложения в систему или приведенные затраты.

Он является наиболее простым и дает приемлемые практические результаты. Однако эффективность любой системы не сводится к ее экономической эффективности

В общем случае эффективность – это нормированный к затратам ресурсов результат действия системы на определенном интервале времени.

Сравнивая затраты ресурсов на реализацию систем РПГО, использующих сеть радиолокационных

станций или спутниковый мониторинг с предлагаемой системой, использующей существующую разветвленную сеть мобильной связи, можно сделать вывод о высокой экономической эффективности предлагаемых технических решений.

358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 12:50:48	5202
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 11:50:46	5200
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 10:50:48	5198
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 09:50:47	5204
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 08:50:47	5082
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 07:50:48	5124
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 06:50:48	5202
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 05:50:47	5200
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 03:50:45	5198
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 02:50:48	5202
358511021229210	-49.9874	36.2285	0	2015-07-21 00:50:46	5106

Рисунок 5 – Просмотр ретроспективной информации

Выводы. Разработан алгоритм распознавания и автоматизированного ввода в базу данных картографической информации и спутниковых карт, с наложением в динамическом режиме соответствующих зон измерения и их результатов. Причем, каждая из зон оттенена определенным цветом, характеризующим уровни грозовой опасности.

Предложен метод передачи на центральный компьютер с помощью системы мобильной связи распределенной информации о грозовой опасности с накоплением ее в базе данных.

Создана информационно-поисковая система, построенная на запросах к базе данных, размещенной на сервере, доступ которой осуществляется с любого компьютера, входящего в глобальную сеть.

Список литературы: 1. Семенов К.А. Соотношение между числом внутриоблачных разрядов и разрядов на землю / К.А. Семенов // Тр. ГГО. – 1967. – Вып. 204. – С. 68-69. 2. Mac Gorman D. Improved timeliness of thunderstorm detection from mapping a larger fraction of lightning flashes / D.Mac Gorman, I.Apostolopoulos, A.Nierow, M.Murphy, N.Demetriades, J.Cramer, P.Krehbiel // Lightning Imaging Sensor Intl. Workshop, 11–14 September, Huntsville, Ala., Univ. of Ala. Huntsville and National Space Science and Tech. Center, 2006. 3. Аксенов С.А. Автоматизированный анализ и прогноз опасных явлений погоды на основе таксономического сопряжения радиолокационной и другой информации / Дисс. на соискание степени канд.

физ.-мат. наук / г. Нальчик, 2009. 4. Серков А.А. Гибридная модель модуля управления когнитивной самоорганизующейся сети базовых станций / А.А. Серков, И.И. Обод, С.А. Никитин // Научные ведомости БелГУ. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. – 2013. – № 15 (158). Вып. 27/1. – С. 228–232. 5. Обод И.И. Моделирование телекоммуникационных систем та мереж : Навчальний посібник / І.І.Обод, Л.О.Нікітіна, С.О.Нікітін // За заг. ред. І.І.Обод. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – 250 с. 6. Климаш М.М. Технології мобільного зв'язку / М.М.Климаш, В.О.Пелішюк, П.М.Михайленч. – Львів, 2007. – 615 с. 7. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / В.А.Григорьев, О.И.Лагутенко, Ю.А.Распаев. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с. 8. Alazemi H.M.K. Stochastic modeling and analysis of 802.11 DCF with heterogeneous non-saturated nodes / H.M.K.Alazemi, A.Margolis, J.Choi, R.Vijaykumar, S.Roy. – Computer Communications. – 2007. – Vol. 30, No. 18. – P. 3652-3661. 9. Шахнович И. В. Современные технологии беспроводной связи. Издание второе, исправленное и дополненное / И. В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с. 10. Серков О.А. Комбіновані методи множинного доступу у телекомунікаційних мережах / О.А. Серков, І.І. Обод, С.О. Нікітін // Системи обробки інформації. – 2013. – Вып. 6 (113). 11. Дронов В.М., Князев В.В. Комп'ютерна програма «Розрахунок ймовірностей рівнів блискавкозахисту будівель та споруд об'єкту («Захист»)» – Зареєстровано у Державній службі інтелектуальної власності України, реєстраційний №60092 від 09.06.2015.

Bibliography (transliterated): 1. Semenov K.A. Sootnoshenie meschdu chislom vnutriblachnich razrjadov i razrjadov na zemlju. K.A. Semenov. Tr.GGO. 1967. Vol. 204. 68-69. Print. 2. Mac Gorman D., Apostolopoulos, I., Nierow, A., Murphy, M., Demetriades, N., Cramer, J., Krehbiel, P. Improved timeliness of thunderstorm detection from mapping a larger fraction of lightning flashes. Lightning Imaging Sensor Intl. Workshop, 11–14 September, Huntsville, Ala., Univ. of Ala. Huntsville and National Space Science and Tech. Center, 2006. Print. 3. Aksenov S.A. Avtomatizirovanij analiz i prognoz opasnich javlenij pogodi na osnove taksonomicheskogo sopryazhenija radiolokatsionnoj I drugoj informatsii. Diss. Na soiskanie stepeni kand. fiz.- mat.nauk. Nalchik, 2009. Print. 4. Serkov A.A. Gibrndnaja model modulja upravlenija kognitivnoj samoorganizujushejsja seti bazovih stancij. A.A. Serkov, I.I. Obod, S.A. Nikitin. Nauchnie vedomosti BelGU. Serija: Istorija. Politologija. Economica. Informatica. 2013. № 15(158). Vol. 27/1. 228–232. Print. 5. Obod I.I., Nikitina L.A., Nikitin S.A. Modeluvannja telecommunicatsijnih system ta meresch. Za zag. red. I.I. Ododa: Navchalnij posibnik. Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. 250. Print. 6. Klimash M.M., Pelischok V.O., Michalenich P.M. Technologii mobilnogo svjazku. Lviv, 2007. 615. Print. 7. Grigoprjev V.A., Lagutenko O.I., Raspaev Ju.A. Seti i sistemi radiodostupa. Moscow: Eko-Trendz, 2005. 384. Print. 8. Alazemi H.M.K., Margolis A., Choi J., Vijaykumar R., Roy S. Stochastic modeling and analysis of 802.11 DCF with heterogeneous non-saturated nodes. Computer Communications, 2007, vol. 30, No. 18, 3652-3661. Print. 9. Shachnovich I.V. Sovremennie tehnologii besprovodnoj svjazi. Izdanie vtoroe, ispravlennoe I dopolnennoe. Moscow: Technosfera, 2006. 288. Print. 10. Serkov O.A. Kombinovani metodi mnoschinnoho dostupu u telekommunikatsijnih mereschach. O.A. Serkov, I.I. Obod, S.O. Nikitin. Sistemi obrobki informatsii. 2013. Vol. 6 (113).Print. 11. Dronov V.M, Knjazev V.V. Kompjuternaja programma "Rozrachunok imovimnostei rivniv bliskavkozachistu budivelj ta sporud objektu («Zachist»)» Zareestrovano u Derschavnij sluscbi intelektualnoi vlasnosti Ukrainu, httstratsijnij No 60092 vid 09.06.2015. Print.

Поступила (received) 19.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Серков Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Системы информации» Национального технического университета «ХПИ», Украина; тел.: (380-57) 707-64-51; e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Alexander Anatolievich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Information systems department, National Technical University «KhPI», Ukraine, tel.: (380-57) 707-64-51; e-mail: saa@kpi.kharkov.ua.

Никитин Сергей Александрович, аспирант кафедры «Системы информации» Национального технического университета «ХПИ», Украина; тел.: (380-57) 700-15-64; e-mail: sergnick@bk.ru.

Nikitin Sergei Alexandrovich, PhD Student of Information systems department, National Technical University «KhPI», Ukraine; tel.: (380-57) 700-15-64; e-mail: sergnick@bk.ru.

Кравченко Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» Национального технического университета «ХПИ», Украина; тел.: (380-57) 707-61-33; e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Kravchenko Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of NIPKI «Molnija» of National Technical University «KhPI», Ukraine; tel.: (380-57) 707-61-33; e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Князев Владимир Владимирович, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, начальник отдела НИПКИ «Молния» Национального технического университета «ХПИ», Украина; тел.: (380-57) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

Knyazev Vladimir Vladimirovich, PhD, Senior Research Scientist, Head of the Department NIPKI «Molnija» of National Technical University «KPI», Ukraine; tel.: (380-57) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua

УДК 621.314:621.373

А. И. ХРИСТО

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ЗВЕНА МАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ГЕНЕРАТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Проведено численное моделирование электромагнитных процессов в магнитно-полупроводниковом генераторе высоковольтных импульсов с последовательно - параллельным преобразовательным звеном во входном контуре. Приведены электрические и магнитные характеристики звеньев сжатия для асимметричного режима колебаний генератора и описан процесс, приводящий к усилению напряжения на продольном конденсаторе параллельного преобразовательного звена. Получены графики электрических и энергетических характеристик генератора в зависимости от питающего напряжения и эквивалентного сопротивления нагрузки. Установлен диапазон эквивалентных сопротивлений нагрузки генератора, при котором достигается наибольшая эффективность преобразовательного звена.

Ключевые слова: магнитно-полупроводниковый генератор, преобразовательное звено, коммутирующий дроссель, электрические и энергетические характеристики

Введение. Техника магнитных генераторов импульсов (МГИ) известна еще с 50-х годов прошлого столетия, однако в то время на фоне быстро развивающейся техники газоразрядных приборов МГИ долгое время оставались не замеченными. В последнее десятилетие возрастающая потребность в генерировании мощных высоковольтных субмикросекундных импульсов с высокой частотой повторения и временной стабильностью привела к разработке магнитно-полупроводниковых генераторов импульсов (МППИ) с улучшенными энергетическими и динамическими показателями. Это достижение стало возможным в результате появления новых магнитных материалов с особыми свойствами, позволяющими получить высокие переключающие характеристики коммутирующих дросселей с минимальными динамическими потерями.

Анализ состояния теории. Основоположниками теории колебаний МГИ являются такие известные ученые, как Л.А. Меерович, И.М. Ватин, Э.Ф. Зайцев, В.М. Кандыкин, И.С. Гарбер, М.А. Розенблат и Г.И. Сторм [1-3]. Ними были заложены основы теории стационарного режима колебаний МГИ, проведены исследования устойчивости и области существования этого режима, предложены методики расчета и конструирования звеньев сжатия МГИ.

Как отмечено в работе [1] «зарядный контур и

первое звено сжатия определяет режим работы генератора, роль остальных звеньев состоит в сжатии импульса до требуемой длительности». Для описания процессов в зарядном контуре и первом звене сжатия использована идеализированная модель кривой намагничивания, при которой последняя аппроксимируется ломаной линией. Согласно этой модели на основной кривой намагничивания коммутирующий дроссель (КД) имеет бесконечно большой импеданс, что дает основание пренебрегать током подмагничивания. При насыщении сердечника КД индуктивность определяется по проницаемости в насыщении. Недостатком этой аппроксимации является то, что она не учитывает потери энергии вызванные токами намагничивания, а также потерями энергии на перемагничивания КД, обусловленные гистерезисным характером намагничивания. Кроме того, при увеличении частоты намагничивающего импульса динамическая характеристика намагничивания будет расширяться, и потери энергии на гистерезис будут становиться все более ощутимыми. Немаловажно отметить, что теория стационарного режима колебаний, изложенная в работе [1] построена на допущении согласованной передачи энергии из генератора в нагрузку, что в принципе является частным случаем из всего множества (энергетических) режимов колебаний генератора. Такой режим колебаний достигается в случае однонаправлен-

ной передачи энергии в сторону нагрузки, а между выходом из насыщения предыдущего дросселя и входом в насыщение последующего дросселя должна присутствовать задержка насыщения. Режим колебаний, при котором отсутствует задержка насыщения, является нерациональным, поскольку энергия, запасенная в конденсаторе предыдущего звена не полностью передается в конденсатор следующего звена. Кроме того, одновременное насыщение сердечников предыдущего и последующего звеньев приводит к нарушению условий однонаправленной передачи энергии. В противоположность этой теории в работе [4] акцентируется внимание на том, что улучшение энергетических и динамических показателей генератора достигается как раз за счет перекрытия во времени импульсных токов в соседних контурах сжатия с нелинейными магнитными элементами. Эти противоположные суждения являются также весомым обстоятельством для более глубоких исследований. В работе предлагается использование комплексного подхода к моделированию электромагнитных процессов в схеме МПГИ, которое позволит отрегулировать работу генератора для получения необходимого режима колебаний, характеристики выходного импульса, энергии рассеиваемой в нагрузке в зависимости от параметров схемы, входного напряжения, эквивалентного сопротивления нагрузки и др.

Целью работы является определение электрических и энергетических характеристик последовательно-параллельного преобразовательного звена магнитно-полупроводникового генератора высоковольтных импульсов путем численного моделирования электромагнитных процессов.

Схема МПГИ и параметры модели. На рис. 1 показана схема двухключевого МПГИ состоящая из последовательно-параллельного звена сжатия, импульсного трансформатора и высоковольтных звеньев сжатия [4-6].

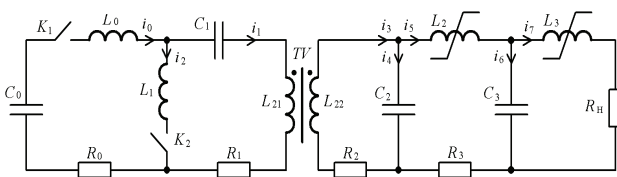


Рисунок 1 Схема МПГИ с последовательно-параллельным преобразовательным звеном

Параметры схемы генератора: емкость конденсатора источника питания $C_0 = 870$ мкФ, емкость конденсатора $C_1 = 1$ мкФ, емкости высоковольтных конденсаторов равны $C_2 = C_3 = 2,4$ нФ, сопротивление первичной цепи трансформатора $TV - R_1 = 0,01$ Ом, сопротивление вторичной обмотки трансформатора $R_2 = 1$ Ом, сопротивление обмотки дросселя $L_2 - R_3 = 0,8$ Ом, сопротивление нагрузки $R_H = 150$ Ом, объемы сердечника высоковольтных дросселей L_2 и L_3 равны $- V_3 = V_4 = 31,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ($50 \times 34 \times 30$), объем сердечника трансформатора $- V_2 = 84,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$

($100 \times 80 \times 30$), количество витков обмоток трансформатора $w_{21} = 14$, $w_{22} = 290$, количество витков обмоток дросселей L_2 и $L_3 - w_3 = 120$, $w_4 = 35$, индуктивность зарядного контура $L_0 = 6$ мкГн, индуктивность разрядного контура $- L_0 = 6$ мкГн напряжение на конденсаторе $C_0 - U_{c0} = 480$ В, период коммутации ключа $K_1 - 1000$ мкс, момент отпирания ключа K_2 по отношению к $K_1 - T_{K2} = 500$ мкс. Для токов и напряжений в контурах схемы (рис.1) на основании законов Кирхгофа составляются интегро-дифференциальные уравнения, которые решаются численно методом Эйлера [7]. Для определения токов и напряжений в цепях генератора, получаем системы алгебраических уравнений (1), (2):

$$\begin{cases} i_0^{k+1} = i_0^k + \frac{a_1 \cdot \Delta t}{L_0 + L_{21} - \frac{M_2^2}{L_{22}}}; \\ i_1^{k+1} = i_1^k + \frac{a_2 \cdot \Delta t}{L_1 + L_{21} - \frac{M_2^2}{L_{22}}}; \\ i_3^{k+1} = i_3^k + \frac{M_2(i_0^{k+1} - i_0^k) - (R_2 \cdot i_3^k + s_2) \cdot \Delta t}{L_{22}}; \\ i_5^{k+1} = i_5^k + \frac{(s_2 - s_3 - R_3 \cdot i_5^k) \cdot \Delta t}{L_3}; \\ i_7^{k+1} = i_7^k + \frac{(s_3 - R_H \cdot i_7^k) \cdot \Delta t}{L_4}; \\ i_4^{k+1} = i_3^{k+1} - i_5^{k+1}; \\ i_6^{k+1} = i_5^{k+1} - i_7^{k+1}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_0 = \frac{1}{2C_0} \sum_{n=1}^k (i_0^n + i_0^{n-1}) \Delta t; \\ S_1 = \frac{1}{2C_1} \sum_{n=1}^k (i_1^n + i_1^{n-1}) \Delta t; \\ S_2 = \frac{1}{2C_2} \sum_{n=1}^k (i_4^n + i_4^{n-1}) \Delta t; \\ S_3 = \frac{1}{2C_3} \sum_{n=1}^k (i_6^n + i_6^{n-1}) \Delta t; \\ a_1 = S_0 + S_1 + R_1 \cdot i_1^k + \frac{M_2}{L_{22}} (R_2 \cdot i_3^k + S_2); \\ a_2 = S_1 + R_1 \cdot i_1^k + \frac{M_2}{L_{22}} (R_2 \cdot i_3^k + S_2); \end{cases} \quad (2)$$

Расчет индуктивных коэффициентов магнитных элементов схемы МПГИ выполняется на основании модели КД, характеристика намагничивания, которого аппроксимируется арктангенсовой функцией [8].

Стационарный режим симметричных колебаний. В схеме на рис. 1 путем изменения момента коммутации ключа K_1 можно регулировать длительность процесса перемагничивания TV и $L_2 - L_3$. В исходном состоянии при $H = 0$ (нулевой момент времени) ин-

дукция в сердечниках L_2, L_3 находится на восходящей кривой гистерезиса. При равной индуктивности зарядного и разрядного контура $L_0 = L_1 = 6$ мкГн через трансформатор проходят одинаковые токи разных направлений, что позволяет формировать на нагрузке биполярные импульсы. Примем что конденсаторы в начальный момент времени полностью разряжены. При отпирании K_1 создаются два связанных колебательных контура $C_0-L_0-L_{21}-R_1-R_0$ и $L_{22}-C_2-R_2$, в которых производится одновременный заряд конденсаторов C_1 и C_2 . В таком случае, конденсаторы оказываются последовательно соединенными через взаимную индуктивность трансформатора, и энергия между ними распределяется приблизительно поровну.

На рис. 2 показано, что после коммутации K_1 характеристики индукций $B_1 - B_3$ в последовательном порядке нарастают до положительного порога насыщения и затем совершают затухающие колебания около принуждающего значения (остаточная индукция).

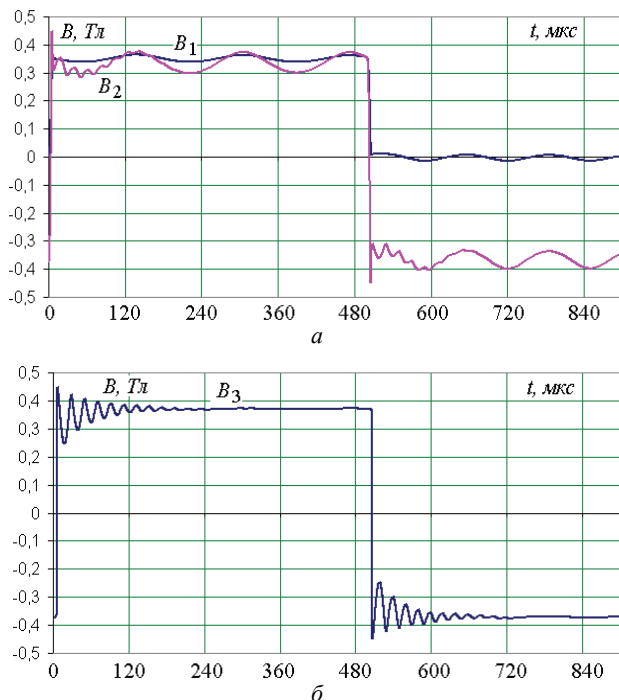


Рисунок 2 – Характеристики индукций в КД и ИТ:
а – B_1 – в ИТ VT, B_2 – в КД L_2 ; б – B_3 – в КД L_3

Динамика колебаний индукции в КД аналогична динамике полученной для схемы с последовательно-параллельным преобразовательным звеном и одним звеном сжатия. Однако, в данном случае, в сердечнике каждого КД будет собственная частота колебаний индукции, зависящая от конструктивных параметров КД и характеристики его намагничивания. Индукция в трансформаторе и первом КД затухает слабо вблизи остаточной индукции, так как собственное сопротивление обмоток слишком мало по сравнению с колебательным контуром. Кроме этого, в начале переходного процесса на затухающие колебания индукции первого КД накладываются колебания индукции второго КД. Характер колебаний индукции стационарного процесса при периодической коммутации ключей K_1 и K_2 будет определяться периодом и скважностью входных

импульсов. Однако изменение периода импульсов и скважности будут мало влиять на уровень входного напряжения (уровень зарядного напряжения на C_1 и уровень остаточного напряжения). Заметим, что при равной зарядной и разрядной индуктивностях уровень остаточного напряжения на конденсаторе достаточно мал по сравнению с зарядным напряжением. Характер индукции B_3 практически не зависит от момента коммутации ключа K_1 и затухает примерно через 160 мкс. Когда отпирается ключ K_2 происходит передача энергии из C_1 в C_2 , характеристики индукций принимают исходные значения, что и до коммутации K_1 . Характеристики индукций противоположных порогов насыщения КД будут зеркально симметричными.

На рис. 3 показаны характеристики стационарного режима колебаний МПГИ при $T_{K1} = 150$ мкс, $T_{K2} = 36$ мкс. Рабочий перепад индукции в каждом КД также будет зависеть от периода T_{K1} и момента коммутации T_{K2} .

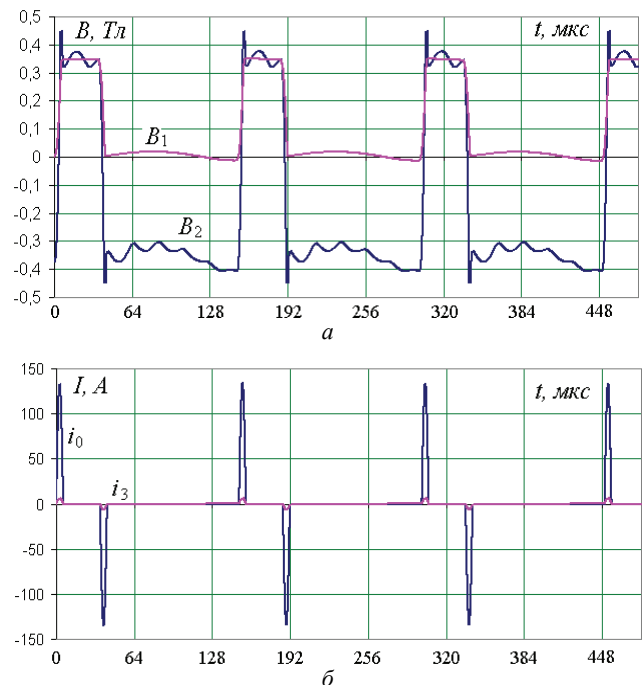


Рисунок 3 – Электромагнитные характеристики стационарного режима колебаний МПГИ:
а – совмещенные характеристики индукций в TV и L_2 ;
б – совмещенные характеристики токов i_0 и i_3

Расчеты показывают, что в достаточно широком диапазоне наблюдается генерация стабильных симметричных биполярных колебаний. Однако может возникнуть ситуация генерирования не симметричных биполярных импульсов, такой режим наблюдается например при $T_{K1} = 80$ мкс, $T_{K2} = 26$ мкс. Можно отметить, что в рассмотренном режиме колебаний МПГИ, схема позволяет генерировать биполярные импульсы с высокой частотой следования определяемой десятками кГц. Частотные показатели МПГИ будут ограничиваться предельной коммутируемой мощностью полупроводниковых ключей и тепловыми потерями в КД. В отличие от схемы МПГИ прямых импульсов [9, 10] зарядное напряжение конденсатора C_1 незначительно

превышает напряжение источника питания, поэтому для достижения такой же номинальной энергии в 0,12 Дж требуется источник питания напряжением 500 В. Недостатком этой схемы является также то, что нагрузка на силовой ключ при той же самой энергии в импульсе в 3 раза выше, нежели в схеме МПГИ прямых импульсов. Основным преимуществом схемы является, то что процесс перемагничивания импульсного трансформатора и высоковольтных дросселей осуществляется одновременно с зарядом (разрядом) конденсатора C_1 .

Стационарный режим асимметричных колебаний. Моделирование МПГИ показывает, что в схеме возможен стационарный режим асимметричных колебаний, который устанавливается при неравной индуктивности зарядного и разрядного контуров. Установлено, что длительность переходного режима колебаний зависит от периода коммутации, поэтому для уменьшения расчетной области и наглядности полученных электромагнитных характеристик, исследования производились при периоде коммутации T_{K1} менее 100 мкс. При таком периоде коммутации выход в установившийся режим колебаний наступает примерно через 5 мс. Для осуществления асимметричного режима колебаний необходимо изменить следующие параметры схемы МПГИ: $L_0 = 24$ мкГн, $L_{01} = 6$ мкГн, $T_{K1} = 80$ мкс, $T_{K2} = 36$ мкс. Также условимся, что конденсатор C_0 не восполняет собственную энергию отдавая ее в нагрузку в процессе коммутации ключей K_1 и K_2 , то есть рассмотрим свободный разряд системы в целом. На рис.4 показаны электромагнитные характеристики в МПГИ переходного процесса режима асимметричных колебаний при свободном разряде конденсатора C_0 . В переходном режиме возбуждаются вынужденные колебания приводящие к усилению напряжения на конденсаторе C_1 . На интервале $0-t_1$ ключ K_1 отперт и происходит одновременный заряд конденсаторов C_1 и C_2 . Однако в момент времени t_{11} находящийся в пределах этого интервала, сердечник КД L_2 оказывается намагничен до положительного порога насыщения, вследствие чего напряжение на конденсаторе C_2 не успевает вырасти до максимума и накопленная энергия передается в следующий. Часть энергии из C_0 передается в C_3 через индуктивность насыщенного КД L_2 , поэтому C_3 заряжается немного до большего напряжения нежели C_2 . Так как теперь период зарядного тока стал более продолжительным напряжение на C_1 продолжает нарастать и в момент t_1 достигает своего максимума. Теперь максимальный уровень напряжения станет выше, нежели для симметричного режима колебаний. В момент времени t_2 отпирается ключ K_2 и производится разряд C_1 на C_2 , а на последнем формируется инверсный импульс с амплитудой 13,5 кВ. Так как КД не рассчитан на запасенную энергию в C_1 , процесс заряда на C_2 обрывается в результате достижения индукции в КД L_2 отрицательного порога насыщения. В момент времени t_3 разрядный ток через ключ K_2 спадает до нуля. В результате рассогласованной передачи энергии на конденсаторах C_1 и C_2 появятся остаточные напряжения разных

полярностей. Под действием положительного остаточного напряжения на C_2 , индукция в КД L_2 (B_2) достигнет положительного порога насыщения. В момент t_4 цикл повторяется и отпирается ключ K_1 , за счет отрицательного остаточного напряжения на C_1 зарядный уровень напряжения к моменту времени t_5 станет еще больше. Так как индукция в КД и трансформаторе находится вблизи положительного порога насыщения, то на C_2 появиться не значительный импульс напряжения. В момент времени t_6 повторно отпирается ключ K_2 , разрядный ток возрастает и на C_2 формируется инверсный импульс еще большей амплитуды нежели предыдущий. Таким образом, за счет не полной передачи энергии, в системе действует положительная обратная связь, приводящая к усилению входного сигнала. Важно заметить, что в интервале t_7-t_8 за счет небольшого остаточного напряжения на C_2 , КД и трансформатор будут частично намагничены к положительному порогу насыщения. В момент времени t_8 размах индукции в трансформаторе и КД будет значительно больше по сравнению с моментом времени t_4 , а зарядное напряжение на C_1 возрастет. При последующих коммутациях ключа K_1 уровень остаточного напряжения на C_2 будет возрастать, а перепад индукции к моменту коммутации K_2 будет сужаться. Оказывается усиление входного тока и напряжения направлено на смещение колебаний индукции в трансформаторе к отрицательному порогу насыщения. Расчеты показывают, что стационарный режим асимметричных колебаний в МПГИ окончательно установится тогда, когда нижний уровень характеристики индукции в трансформаторе достигнет отрицательного порога насыщения. Для данной расчетной модели переходный режим колебаний завершится через 4 мс. Таким образом созданный переходный процесс приводит к смещению уровня симметрии колебаний индукции в трансформаторе, уменьшению рабочего перепада индукции в КД, и как следствие уменьшается амплитуда прямого импульса напряжения на C_2 . Однако через 5 мс, что соответствует примерно 70-ти циклам коммутаций ключей K_1 и K_2 энергии конденсатора C_0 будет недостаточно для поддержания стационарного режима асимметричных колебаний, поэтому колебания в системе ослабнут и наступит симметричный режим колебаний. На рис. 4, в показано, что огибающее колебание импульсов напряжения на C_1 в переходном режиме описывают форму половинчатой гантели. Если энергию конденсатора источника питания поддерживать неизменной, то характер переходного режима будет несколько другой. Входное напряжение с 480 В усиливается до 2 кВ, а амплитуда прямого и инверсного импульсов на C_2 составят соответственно 5 и 20 кВ.

На рис. 5 показаны электромагнитные характеристики в установившемся режиме колебаний МПГИ при неизменной энергии конденсатора C_0 . За счет остаточного напряжения на C_2 в промежутке между коммутациями ключей K_2 и K_1 индукция КД L_2 достигнет положительного насыщения раньше, нежели наступит коммутация K_1 . При этом созданный колебательный контур $C_2-L_2-C_3$ (за счет возросшей сум-

марной емкости) выступает как фильтр нижних частот, который ограничит амплитуду прямого импульса до 5 кВ. Отличительная особенность найденного режима колебаний заключается в том, что индукция в коммутирующих дросселях и импульсном трансформаторе достигает отрицательного порога насыщения на этапе формирования инверсного импульса. Амплитуда прямого и инверсного тока через ИТ для стационарного режима асимметричных колебаний соответственно составят 310 А и 530 А.

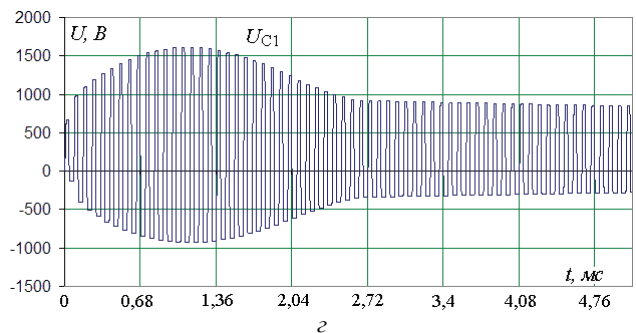
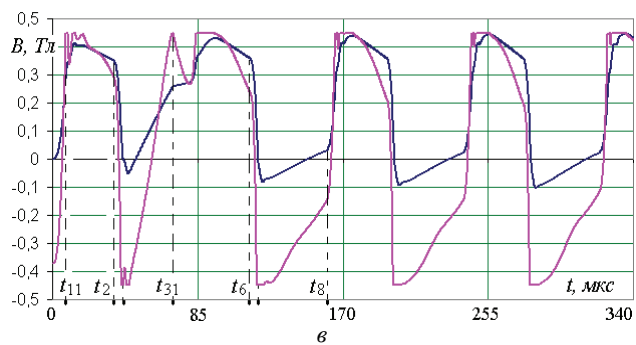
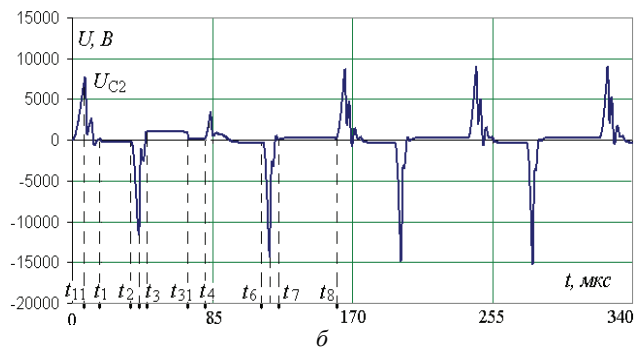
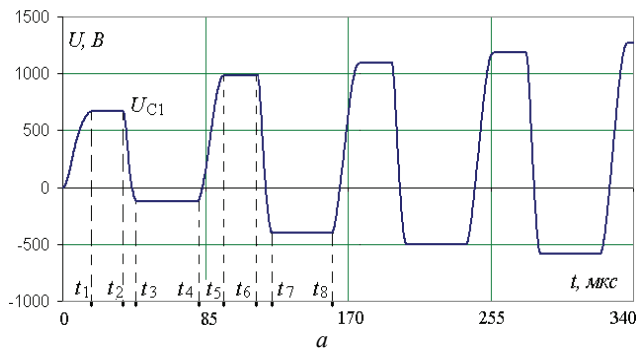


Рисунок 4 – Электромагнитные характеристики на начальном этапе переходного процесса в МПГИ при свободном разряде конденсатора C_0 : а – напряжение на C_1 ; б – напряжение на C_2 ; в – напряжение на C_1 5 мс; г – совмещенные характеристики индукций в ИТ и КД L_2

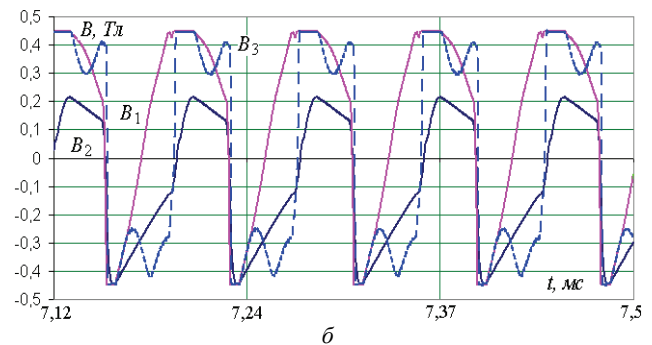
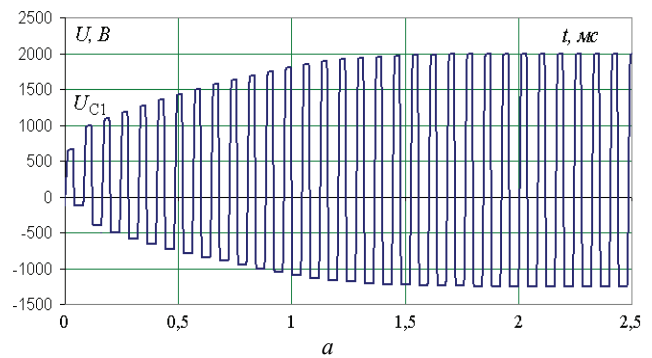


Рисунок 5 – Электромагнитные характеристики в установившемся режиме несимметричных колебаний МПГИ при поддержании заряда конденсатора источника питания: а – характеристика напряжения на конденсаторе C_1 ; б – совмещенные характеристики индукции в ИТ, L_2 , L_3

Электрические и энергетические характеристики преобразовательного звена. На рис.6 показаны электрические и энергетические характеристики параллельного преобразовательного звена в зависимости от эквивалентного сопротивления нагрузки в диапазоне от 60 до 300 Ом и для трех значений питающего напряжения – 1 – 350 В, 2 – 400 В, 3 – 480 В. Семейство характеристик пиковых значений тока и напряжения через преобразовательный элемент K_2 , запасаемой энергии в конденсаторе C_1 имеют подобный характер, который может быть близко аппроксимирован гиперболической функцией. На каждой характеристике можно выделить участок с линейной зависимостью и участок где характеристика имеет высокую крутизну нарастания. Так при входном напряжении 350 В в диапазоне эквивалентных сопротивлений нагрузки от 100 до 300 Ом параллельный преобразовательный узел имеет наиболее линейные и практически независимые от сопротивления нагрузки характеристики. С увеличением питающего напряжения область, где характеристики преобразовательного звена имеют линейный характер сужается в сторону больших сопротивлений нагрузки. Так при входном питающем напряжении 400 В этот диапазон находится от 160 до 300 Ом, а при напряжении 480 В от 220 до 300 Ом. Линейность характеристик преобразовательного звена в соответствующем диапазоне сопротивлений нагрузки при определенном значении входного напряжения, объясняется согласованной передачей энергии из низковольтного конденсатора в высоковольтный. Это тот диапазон энергий, где между выходом и входом в насыщение сердечников КД смежных звеньев сжатия присутствует задержка насыщения,

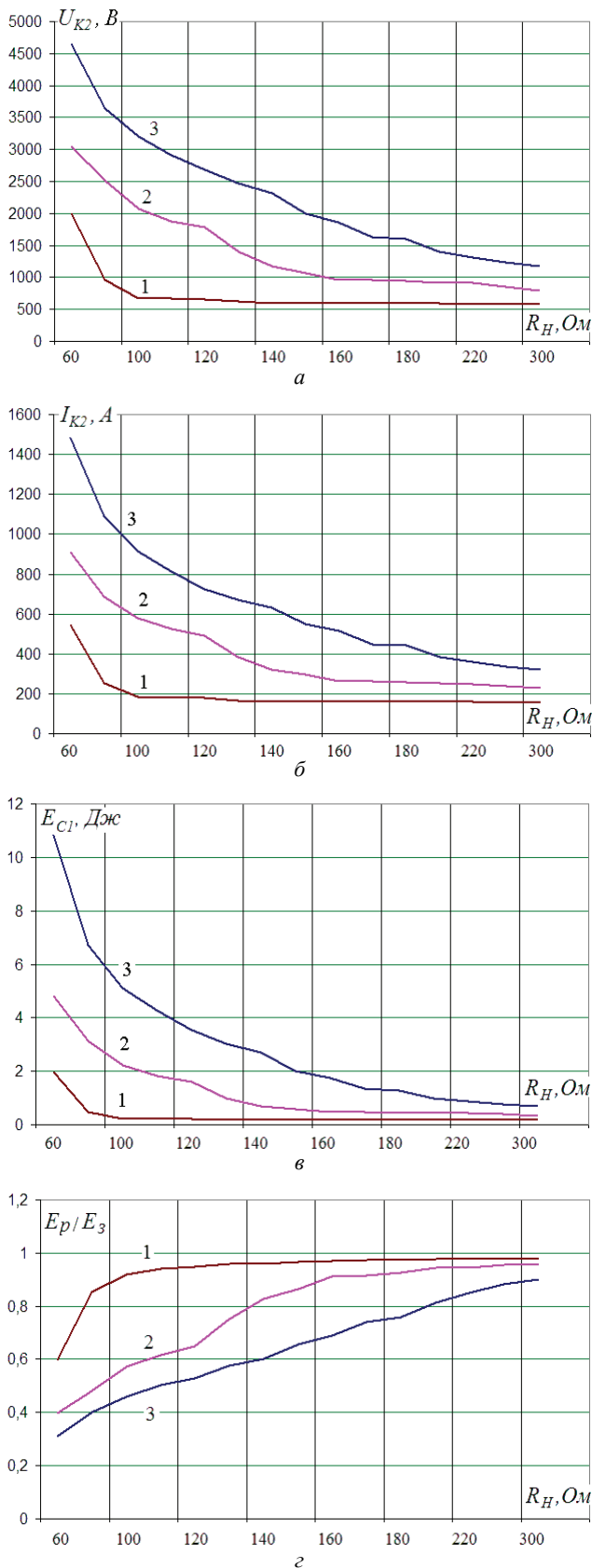


Рисунок 6 – Семейство электрических и энергетических характеристик параллельного преобразовательного звена в зависимости от эквивалентного сопротивления нагрузки: a – пиковое напряжение на ключе K_1 ; $б$ – пиковый ток через ключ K_1 ; $в$ – запасаемая энергия в конденсаторе C_1 ; $г$ – эффективность преобразовательного звена

при этом реализуется однонаправленная передача энергии в нагрузку. По характеристике запасаемой энергии приведенной на рис.6, в. видно, что с уменьшением сопротивления нагрузки и увеличением питающего напряжения происходит увеличение запасаемой энергии в конденсаторе C_1 . В результате чего, пиковый ток и пиковое напряжение на преобразовательном элементе K_2 также возрастают, а сами характеристики располагаются в последовательном порядке по мере увеличения питающего напряжения. На рис.6, г приведено семейство характеристик отображающие эффективность преобразовательного звена, которое оценивается как отношение энергии рассеиваемой в нагрузке и звеньях сжатия к энергии запасаемой в конденсаторе C_1 . Энергию рассеиваемую в звеньях сжатия и нагрузки можно рассчитать, как разность запасаемой энергии C_1 образующейся в результате действия последовательного преобразовательного звена и остаточной энергии C_1 образующейся в результате действия параллельного преобразовательного звена. При питающем напряжении 350 В и в диапазоне эквивалентных сопротивлений нагрузки от 100 до 300 Ом достигается наибольшая эффективность преобразовательного звена, которая лежит в пределах от 0,8 до 0,98. Однако, по мере уменьшения сопротивления нагрузки и увеличения питающего напряжения эффективность преобразовательного звена падает. Так, при питающем напряжении 480 В в диапазоне эквивалентных сопротивлений нагрузки от 60 до 140 Ом уровень запасаемых энергий будет лежать в пределах от 10,8 до 2,7 Дж при этом эффективность преобразовательного звена будет в пределах от 0,3 до 0,6.

На рис. 7 показаны электрические и энергетические характеристики параллельного преобразовательного звена в зависимости от входного напряжения и постоянном эквивалентном сопротивлении нагрузки для двух ее значений – 1 – 80 Ом, 2 – 150 Ом. Семейство характеристик пиковых значений тока и напряжения через преобразовательный элемент K_2 , запасаемой энергии в конденсаторе C_1 имеют подобный характер и описываются нелинейной возрастающей зависимостью. При этом на каждой из характеристик можно выделить три участка, в пределах которых сама характеристика остается близкой к линейной и отличается углом наклона относительно оси абсцисс. Так в диапазоне от 260 до 360 В для выбранных значений сопротивлений характеристики преобразовательного звена практически совпадают и их графики сливаются. Пределы второго и третьего интервала характеристик для выбранных сопротивлений нагрузки отличаются. Так для сопротивления 80 Ом и 150 Ом второй диапазон напряжений лежит в пределах от 380 до 400 В, и от 380 до 440 В соответственно, а третий в пределах от 400 В до 540 В, и от 440 до 540 В соответственно. В начале второго интервала характеристики преобразовательного звена для выбранных сопротивлений нагрузки расходятся под разными углами, при этом характеристики преобразовательного звена для меньшего сопротивления нагрузки имеет больший угловой коэффициент. На третьем интервале характеристики имеют близкий угловой коэффициент.

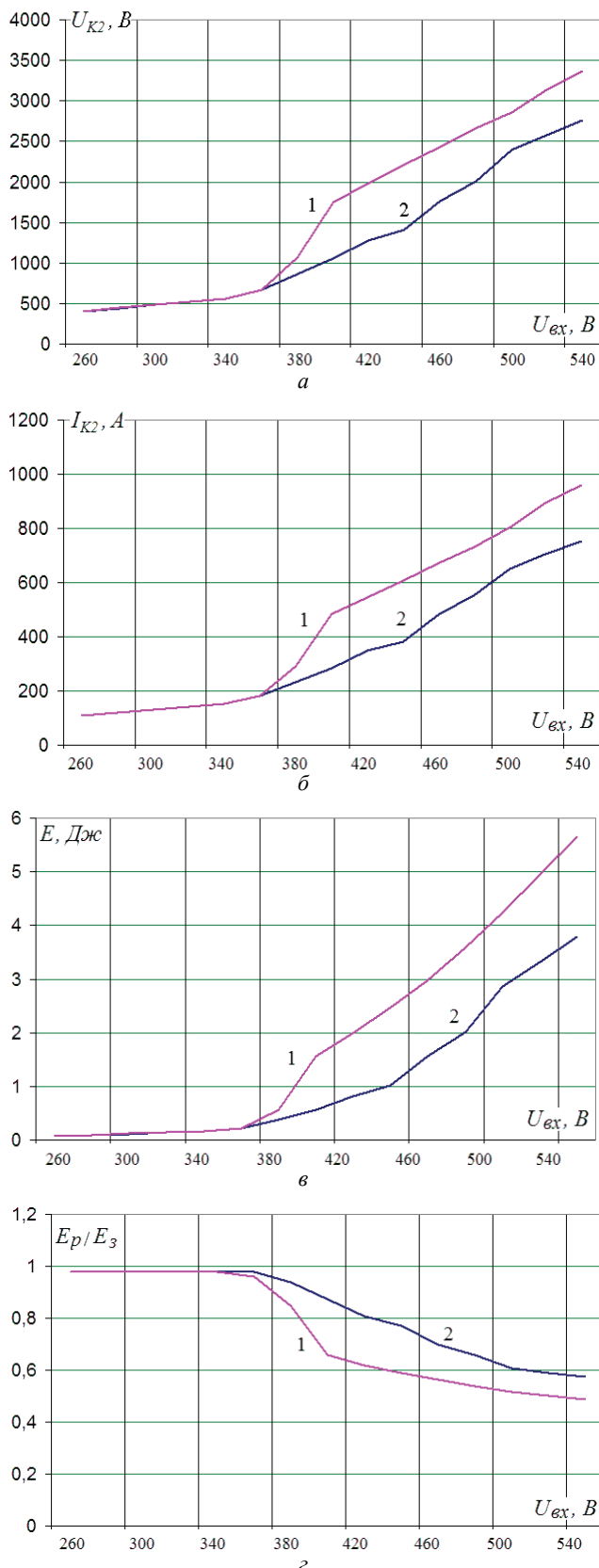


Рисунок 7 – Семейство электрических и энергетически характеристик параллельного преобразовательного звена в зависимости от питающего напряжения: *a* – пиковое напряжение на ключа K_1 ; *б* – пиковый ток через ключ K_1 ; *в* – запасаемая энергия в конденсаторе C_1 ; *г* – эффективность преобразовательного звена.

Наибольшая эффективность преобразовательного звена для выбранных сопротивлений нагрузки достигается в диапазоне питающих напряжений от 260 до 360 В, где характеристики сливаются и составляет 0,98. В диапазоне питающих напряжений от 360 до 400 В эффективность преобразовательного звена для характеристики 1 падает стремительнее, чем для характеристики 2, однако в диапазоне граничных напряжений от 500 до 540 В характеристика 2 приближается к характеристике 1. В области питающих напряжений от 360 до 540 В характеристика запасаемой энергии начинает круто нарастать, что является следствием рассогласованной передачи энергии из конденсатора преобразовательного звена в высоковольтный конденсатор. Такое поведение объясняется тем, что в результате возрастания запасаемой энергии C_1 исчезает задержка насыщения КД и токи в соседних звеньях сжатия накладываются друг на друга. Поэтому остаток энергии на конденсаторе C_1 после действия параллельного преобразовательного звена будет тем больше, чем глубже накладываются токи в соседних звеньях сжатия.

Выводы. Установлено, что в магнитно–полупроводниковом генераторе высоковольтных импульсов с последовательно–параллельным преобразовательным звеном при соблюдении условия, что зарядная индуктивность намного больше разрядной наступает стационарный режим асимметричных колебаний, который в отличие, от симметричного режима колебаний характеризуется усилением напряжения на продольном конденсаторе, увеличением энергии рассеиваемой в нагрузке, усилением амплитуды инверсного импульса.

Показано, что раскачка напряжения на продольном конденсаторе последовательно – параллельного преобразовательного звена происходит по двум причинам, а именно: а) на этапе формирования прямого импульса, образующийся фильтр нижних частот препятствует передаче энергии в нагрузку, поэтому зарядное напряжение на продольном конденсаторе возрастает; б) на этапе формирования инверсного импульса неполная передача энергии из продольного конденсатора в последующие приводит к появлению на первом отрицательного остаточного напряжения, поэтому при последующем зарядном такте уровень зарядного напряжения на нем станет большим на величину остаточного напряжения.

Показано, что линейность характеристик преобразовательного звена в соответствующем диапазоне сопротивлений нагрузки при определенном значении входного напряжения, объясняется согласованной передачей энергии из конденсатора параллельного преобразовательного звена в высоковольтный конденсатор. В то же время, резкий рост характеристики запасаемой энергии в области предельных питающих напряжений при постоянном сопротивлении нагрузки является следствием рассогласованной передачи энергии из конденсатора параллельного преобразовательного звена в высоковольтный конденсатор.

Список литературы: 1. *Меерович Л.А.* Магнитные генераторы импульсов / *Л.А. Меерович, И.М. Ватин, Э.Ф. Зайцев, В.М. Кандыкин*. – М.: Советское радио, 1968. – 475 с. 2. *Гарбер И.С.* Магнитные импульсные модуляторы / *И.С. Гарбер*. – М.: Советское радио, 1964. – 159 с. 3. *Сторм Г.Ф.* Магнитные усилители / *Г.Ф. Сторм*. – М.: ИЛ, 1957. – 568 с. 4. *Волков И.В.* Магнитно-полупроводниковые генераторы с разнофункциональными узлами магнитной компрессии импульсов / *И.В. Волков, В.И. Зозулев, Д.А. Шолох* // Пр. Института электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. К.: ІЕД НАН України. – 2010. – Вип. 26. – С. 79–89. 5. *Nakhe S.V.* Energy deposition studies in a copper vapor laser under different pulse excitation schemes / *S.V. Nakhe, B.S. Rajanikanth, R. Bratnagar* // Measurement Science and Technology. – 2003. – № 14. – P. 608. 6. *Pokryvailo A.* A Compact Source of Sub-Gigawatt, Subnanosecond Pulses / *A. Pokryvailo, Y. Yankelevich, M. Shapira* // IEEE Transactions on Plasma Science. – October 2004. – Vol. 32, No. 5. – P. 1909-1918. 7. *Демидович Б.П.* Численные методы анализа / *Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова*. – М.: Наука, 1967. – 368 с. 8. *Христо А.И.* Численное моделирование электромагнитных процессов в схеме магнитного генератора импульсов / *А.И. Христо, В.И. Зозулев, Д.А. Шолох* // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 2. – С. 22–28. 9. *Христо А.И.* Магнитно-транзисторный генератор для формирования высоковольтных импульсов субмикросекундной длительности / *А.И. Христо* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52. – С. 190–202. 10. *Choi J.* Introduction of the magnetic pulse compressor (mpc) – fundamental review and practical application / *J. Choi* // Journal of electrical engineering & technology. – 2010. – Vol. 5, № 3. – P. 484–492.

Bibliography (transliterated): 1. *Meerovich L.A.* Magnitnye generatory impul'sov. *L.A. Meerovich, I.M. Vatin, Je.F.Zajcev, V.M. Kandykin*. – Moscow: Sovetskoe radio, 1968. 475. Print. 2. *Garber I.S.* Magnitnye impul'snye moduljatory. *I.S. Garber*. Moscow: Sovetskoe radio, 1964. 159. Print. 3. *Storm G.F.* Magnitnye usiliteli. *G.F. Storm*. Moscow: IL, 1957. 568. Print. 4. *Volkov I.V.* Magnitno-poluprovodnikovye generatory s raznofunkcional'nymi uzlami magnitnoj kompressii impul'sov. *I.V. Volkov, V.I. Zozulev, D.A. Sholoh*. Pr. Institutu elektrodinamiki NAN Ukraini: Zb. nauk. pr. K.: IED NAN Ukraini. 2010. Vol. 26. 79-89. Print. 5. *Nakhe S.V.* Energy deposition studies in a copper vapor laser under different pulse excitation schemes. *S.V. Nakhe, B.S. Rajanikanth, R. Bratnagar*. Measurement Science and Technology. 2003. No 14. 608. Print. 6. *Pokryvailo A.* A Compact Source of Sub-Gigawatt, Subnanosecond Pulses. *A. Pokryvailo, Y. Yankelevich, M. Shapira*. IEEE Transactions on Plasma Science. Vol. 32, No. 5. 1909-1918, October 2004. Print. 7. *Demidovich B.P.* Chislennyye metody analiza. *B.P. Demidovich, I.A. Maron, Je.Z. Shuvalova*. Moscow: Nauka, 1967. 368. Print. 8. *Khristo A.I.* Chislennoe modelirovanie jelektromagnitnyh processov v sheme magnitnogo generatora impul'sov. *A.I. Khristo, V.I. Zozulev, D.A. Sholoh*. Tehnichna elektrodinamika. 2014. No 2. 22–28. Print. 9. *Khristo A.I.* Magnitno-tranzistornyj generator dlja formirovaniya vysokovol'tnyh impul'sov submikrosekundnoj dlitel'nosti. *A.I. Khristo*. Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «KhPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. 2012. No 52. 190–202. Print. 10. *Choi J.* Introduction of the magnetic pulse compressor (mpc) – fundamental review and practical application. *J. Choi*. Journal of electrical engineering & technology. 2010. Vol 5. No 3. 484–492. Print.

Поступила (received) 08.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Христо Александр Иванович, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної Академії Наук України, молодший науковий співробітник; тел.:+38(068) 116-11-94; e-mail: alexander.khristo@ukr.net.

Khristo Aleksander Ivanovich, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Research Assistant; tel.:+38(068) 116-11-94; e-mail: alexander.khristo@ukr.net.

УДК 537.529:620.3:621.762

П. Л. ЦОЛИН, А. Ю. ТЕРЕХОВ

СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ КАРБИДОВ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Проведены экспериментальные исследования возможности синтеза карбидов металлов электровзрывным методом (в качестве проводника использовали вольфрам и молибден). Установлено, что основным фактором, влияющим на фазовый и дисперсный составы синтезированных наноразмерных порошков карбидов, является отношение выделившейся энергии к энергии сублимации проводника. Показано, что выход насыщенных углеродом фаз и дисперсность карбидов возрастает, а содержание остаточного металла в продуктах взрыва уменьшается с ростом величины энергии.

Ключевые слова: электровзрыв проводников; карбиды металла; наноразмерные порошки карбидов; паста, содержащая углеродный наноматериал; рентгенофазовый анализ.

Введение. Карбиды относятся к широкому классу соединений, обладающих рядом ценных свойств, делающих их перспективными материалами для использования в различных областях новой техники. Карбиды металлов, особенно переходных, обладают высокими температурами плавления и твердостью, высокой химической стойкостью, металлическим характером электропроводности и теплопроводности, а также рядом специальных свойств – способностью переходить в сверхпроводящее состояние при относи-

тельно высоких температурах, высокими эмиссионными свойствами и др.

В настоящее время все большее применение в различных областях науки, промышленности и техники находят нанопорошки карбидов металлов. Нанопорошки используются в полупроводниковой промышленности, порошковой металлургии, для производства композиционных и керамических материалов с уникальными свойствами [1], для создания сплавов с улучшенными механическими свойствами, для горно-

добывающей и металлообрабатывающей промышленности. При переходе в нанобласть за счет снижения размера зерна повышается твердость и износостойкость изделий, их термостойкость и коррозионная стойкость в агрессивных средах.

Анализ предварительных исследований и литературы. Традиционные методы получения тугоплавких карбидов основаны на прямой реакции порошков металла или оксида металла с углеродом при нагревании в течение нескольких часов. Эти процессы являются энергоемкими, а высокие температуры синтеза (до 1800 °С) затрудняют получение наноразмерных порошков карбидов металлов [2-5].

Одним из способов получения нанопорошков карбидов металлов является метод электрического взрыва проводников (ЭВП) в разреженной углеводородной среде с добавлением инертных газов в герметичной разрядной камере (Российская Федерация, г. Томск) [6]. Недостатком этого подхода является неравномерность реакции карбонизации металла в объеме разрядной камеры. Продукты электрического взрыва (ЭВ) содержат только часть карбидов, а полученные карбиды имеют дефицит углерода.

Анализ диаграммы состояния системы $Mo-C$ показал, что при температурах до 1900 К стабильным является только субкарбид Mo_2C , а ниже 1453 К – гексагональный монокарбид MoC . В карбиде Mo_2C при температурах до 1700 К углеродная часть решетки упорядочена. В качестве высокотемпературных фаз, которые лишь с трудом могут быть зафиксированы резким охлаждением, присутствуют гексагональный монокарбид $\zeta-MoC_{1-x}$ и гранецентрированный кубический (ГЦК) монокарбид $\alpha-MoC_{1-x}$.

Из анализа диаграммы состояния системы $W-C$ следует, что существует несколько кристаллических модификаций карбида вольфрама, отличающихся параметрами решетки: низкотемпературная $\alpha-WC$, высокотемпературная $\beta-WC$ и ряд модификаций W_2C . Фаза W_2C имеет гексагональную решетку. В зависимости от температуры, карбид вольфрама W_2C может иметь несколько кристаллических форм (α -, β -, γ -, ε -фазы), отличающихся степенью упорядоченности атомов углерода в октаэдрических пустотах плотнейшей упаковки из атомов вольфрама или типом кристаллической решетки. Низкотемпературная модификация монокарбида вольфрама $\alpha-WC$ имеет простую гексагональную кристаллическую решетку. Высокотемпературная модификация $\beta-WC$ кристаллизуется в виде плотнейшей ГЦК решетки и в отсутствие кислорода устойчива при температурах выше 2800 К. Фазу $\beta-WC$ можно рассматривать как нестехиометрический ГЦК-карбид WC_{1-x} , где $0 \leq x \leq 0,41$. Нестехиометрический карбид WC_{1-x} переходит через температуру упорядочения и стремится в упорядоченное состояние при охлаждении от температуры синтеза до комнатной температуры. Превращения порядок-беспорядок в карбидах являются фазовыми переходами первого рода со скачкообразным изменением объема. Высокие температуры синтеза карбидов вольфрама в процессе ЭВП и быстрое охлаждение образующихся порошков могут приводить к стабилизации метастабильного карбида

WC_{1-x} [7,8].

Актуальным для развития технологии получения нанопорошков карбидов металлов ЭВ методом является решение задач, связанных с осуществлением равномерности реакции карбонизации металлов в углеводородной среде и повышением содержания карбидов в продуктах электровзрыва до 100 %.

Для насыщения углеродом продуктов диспергирования в процессе ЭВП предложено повысить плотность окружающей проводник углеродсодержащей среды и активность углерода за счет использования углеродных наноматериалов (УНМ), полученных методом электроразрядной обработки (ЭРО) жидких углеводородов [9, 10]. Для получения углеродной пасты – кашицеобразного материала, содержащего УНМ и частично органическую жидкость, проводили ЭРО керосина и циклогексана.

Цель работы – установить зависимости между электрическими параметрами, фазовым составом и дисперсностью порошков, образующихся в процессах электровзрыва вольфрамовых и молибденовых проводников в пастах, содержащих УНМ.

Методика исследований. В качестве сырья для синтеза ЭРО были выбраны органические жидкости с разной степенью гибридизации электронов в атомах углерода - циклогексан (sp^3 -гибридизация) и керосин (sp^2 -гибридизация).

В основу методики получения электроразрядным методом углеродной пасты – кашицеобразного материала, содержащего УНМ и органическую жидкость, положен разряд генератора импульсных токов с запасной энергией 0,5 кДж и частотой следования импульсов до 10 Гц на межэлектродный промежуток, заполненный органической жидкостью.

Для оптимизации процесса получения углеродной пасты был использован метод прессфльтрации, который позволил в разы увеличить скорость выделения УНМ из обрабатываемой жидкости и тем самым повысил технологичность и эффективность получения пасты.

После электроразрядной обработки углеводородов при оптимальных режимах пикнометрическим методом определены плотности полученных паст, приведенные в (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты измерения плотности

Образец пасты	Обрабатываемая жидкость	ρ_n , г/см ³
T-02	циклогексан	1,420
T-03	керосин	1,304

ЭВ молибденовых и вольфрамовых проводников проводили при различных режимах ввода электроэнергии, используя два вида пасты. Пасту либо наносили на поверхность проводника (толщина слоя 0,2 мм), либо проводник вводили в капсулу диаметром 2 мм, которую заполняли пастой.

Для реализации ЭВП сначала выбирали согласованный режим электровзрыва [12], при котором вся энергия, накопленная в конденсаторной батарее, выделяется в первый полупериод тока и обеспечивает

однородное испарение металла. Затем запасаемую энергию увеличивали, изменяя зарядное напряжение или емкость конденсаторной батареи.

ЭВ молибденовых и вольфрамовых проводников в воздушной среде (с пастой и без пасты) осуществлялся на экспериментальном стенде в разрядной камере (см. рис. 1).

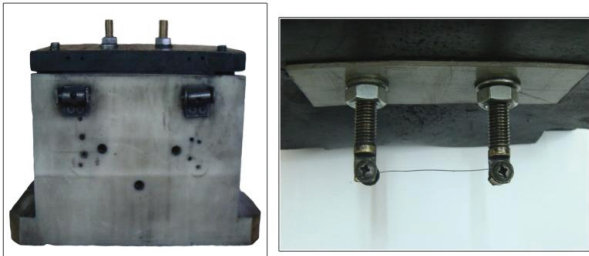


Рисунок 1 – Разрядная камера и электродная система с заданным межэлектродным промежутком для ЭВ металлических проводников

На экспериментальной установке была проведена серия работ, посвященная определению эффективных для синтеза карбидов режимов электровзрыва молибденовых и вольфрамовых проводников с использованием паст, полученных в процессе ЭРО органических жидкостей (циклогексан и керосин).

Продукты ЭВ представляли собой порошки. Рентгенофазовый анализ полученных порошков проводился на дифрактометре ДРОН-3 в Национальном университете кораблестроения имени адмирала Макарова.

Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) нанокристаллов синтезированных карбидных фаз определяли по формуле Шеррера [13]

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos(2\theta/2)}, \quad (1)$$

где d – диаметр наночастицы, нм; β – ширина рентгеновского максимума на полувысоте, рад.; λ – длина волны рентгеновского излучения, нм; k – константа Шеррера.

Синтез нанодисперсных карбидов металла методом ЭВ молибденовых проводников в пасте, содержащей УНМ. Удельная энергия сублимации W_s для молибдена известна, расчет энергетических параметров контура для реализации оптимального режима электровзрыва сводится, главным образом, к определению значения запасаемой энергии $W_0 = W_s$, которая, например, для молибденового проводника радиусом $a = 0,3$ мм и длиной $l = 50$ мм составляет $W_s = 253$ Дж. Из выражения $W_0 = 0,5 C U_0^2$ находим начальные параметры контура – емкость конденсаторной батареи $C = 3$ мкФ, зарядное напряжение $U_0 = 12$ кВ.

В процессе работы были получены временные зависимости тока и напряжения в процессе электровзрыва проводников без пасты и с нанесенным слоем пасты. По временным зависимостям тока и напряжения для разных режимов электровзрыва были рассчитаны энергии, введенные в проводник до момента взрыва (W_e).

Получены временные зависимости тока и напря-

жения в процессе электровзрыва проводников без пасты и с нанесенным слоем пасты толщиной 0,2 мм, полученной ЭРО керосина, которые представлены на рис. 2. Введенные за первый полупериод энергии $W_e = 185$ Дж – для проводника без пасты и $W_e = 191$ Дж – для проводника с нанесенной пастой.

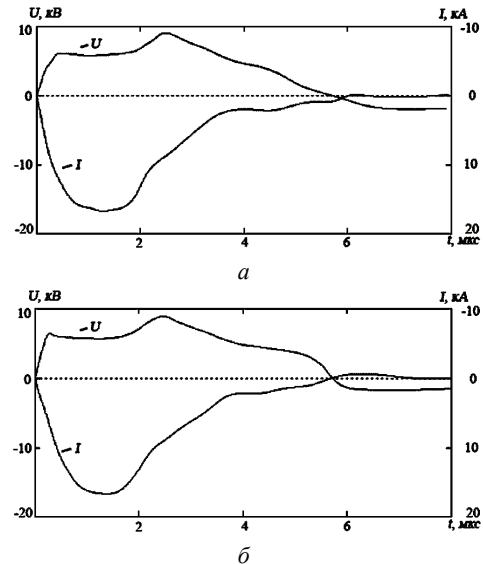


Рисунок 2 – Временные зависимости тока и напряжения ЭВ молибденового проводника $U_0 = 13$ кВ; $C = 3$ мкФ; $a = 0,3$ мм; $l = 50$ мм; $W_e/W_s = 0,7$:
а – без пасты, б – с пастой, полученной ЭРО керосина

В дальнейшем запасаемую энергию увеличили в 1,5 раза. Временные зависимости тока и напряжения для ЭВ с пастой и без представлены на рис. 3.

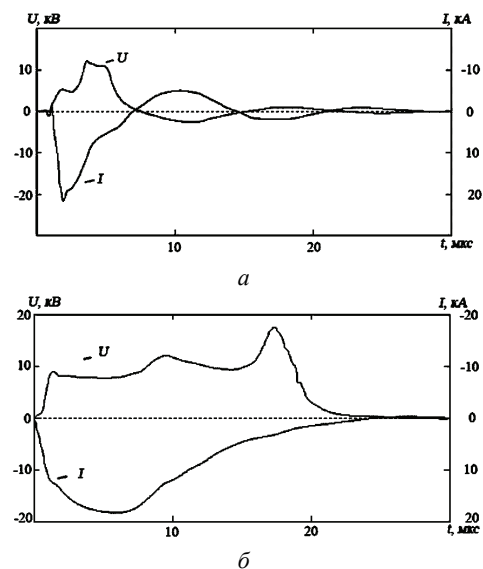


Рисунок 3 – Временные зависимости тока и напряжения ЭВ молибденового проводника $U_0 = 16$ кВ; $C = 3$ мкФ; $a = 0,3$ мм; $l = 50$ мм; $W_e/W_s = 0,8$:
а – без пасты, б – в пасте, полученной ЭРО циклогексана

Из временных зависимостей тока и напряжения, полученных при увеличении запасаемой энергии до 432 Дж (см. рис. 4) следует, что реализован согласованный режим электровзрыва.

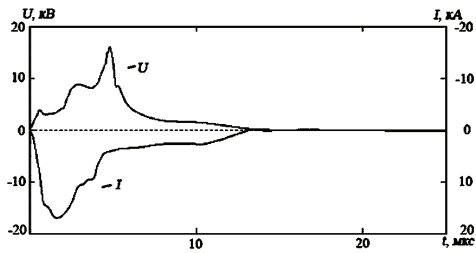
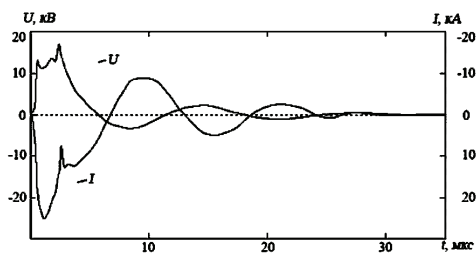
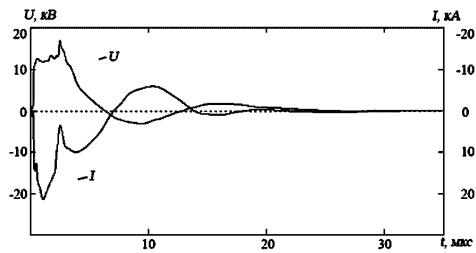


Рисунок 4 – Временные зависимости тока и напряжения ЭВ молибденового проводника в пасте, полученной ЭРО циклогексана (толщина слоя 0,2 мм)
 $U_0 = 12$ кВ; $C = 6$ мкФ; $a = 0,3$ мм; $l = 50$ мм; $W_e/W_s = 1$

При увеличении запасаемой энергии до 1,4 кДж реализуется режим ЭВП с повторным пробоем. Временные зависимости тока и напряжения в процессе ЭВ проводника представлены на рис. 5 и 6.



а



б

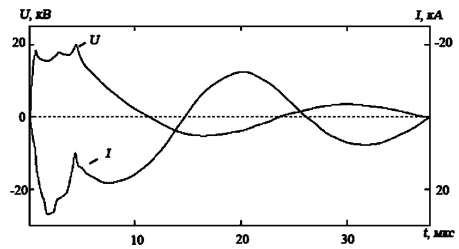
Рисунок 5 – Временные зависимости тока и напряжения ЭВ молибденового проводника в пасте $U_0 = 19,5$ кВ; $C = 6$ мкФ; $a = 0,3$ мм; $l = 50$ мм; $W_e/W_s = 1,7$: а – паста получена ЭРО циклогексана, $W_e = 516$ Дж; б – паста получена ЭРО керосина (толщина слоя 2 мм), $W_e = 439$ Дж

Исследованы продукты электровзрыва молибденовых проводников диаметром 0,3 мм, полученные при разных величинах запасаемой энергии – от 0,25 до 1,2 кДж (режим с повторным пробоем без паузы тока), дифрактограммы которых представлены на рис. 7.

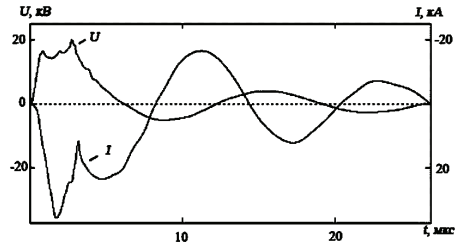
Как следует из сравнения дифрактограмм (см. рис. 7, г и 7, д; 7, е и 7, ж), влияния вида используемых паст на фазовый состав синтезированных карбидов не обнаружено.

Химический состав примесей, обнаруженных в продуктах электровзрыва, аналогичен составу примесей, содержащихся в пастах.

Согласно данным рентгенофазового анализа, продукты электровзрыва молибденовых проводников в пастах представляют собой карбиды молибдена гексагональной (Mo_2C) и кубической (αMo_2C) модификаций с примесью остаточного молибдена. По ширине рентгеновских максимумов (см. рис. 7, а–ж) определены размеры ОКР (см. ф-лу (1)), по которым



а



б

Рисунок 6 – Характерные временные зависимости тока и напряжения ЭВ молибденового проводника в пасте $U_0 = 22$ кВ; $C = 6$ мкФ; $a = 0,3$ мм; $l = 50$ мм; $W_e/W_s = 3$: а – паста получена ЭРО циклогексана, $W_e = 700$ Дж; б – паста получена ЭРО керосина (толщина слоя 2 мм), $W_e = 875$ Дж

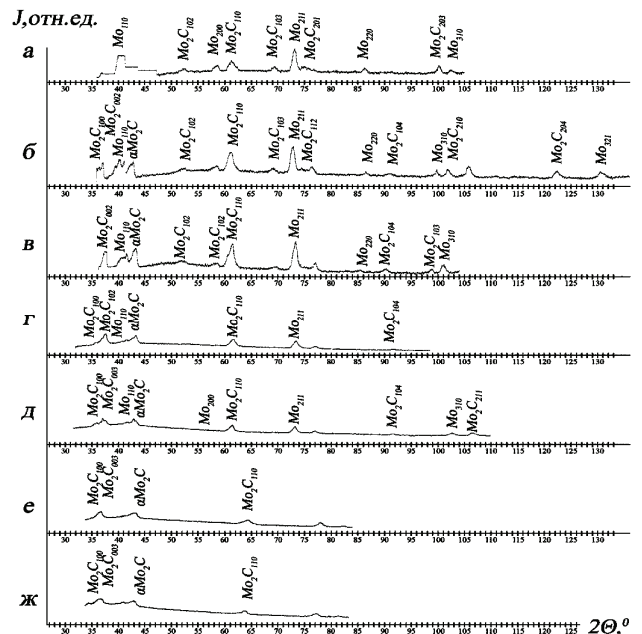


Рисунок 7 – Дифрактограммы порошковых образцов, полученных в процессе ЭВ молибденовых проводников в пастах при разных энергиях:

- а – паста получена ЭРО керосина, толщина слоя 0,2 мм, $W_e/W_s = 0,7$;
- б – паста получена ЭРО керосина, толщина слоя 0,2 мм, $W_e/W_s = 0,8$;
- в – паста получена ЭРО циклогексана, толщина слоя 0,2 мм, $W_e/W_s = 1$;
- г – паста получена ЭРО керосина, толщина слоя 2 мм, $W_e/W_s = 1,7$;
- д – паста получена ЭРО циклогексана, толщина слоя 2 мм, $W_e/W_s = 2$;
- е – паста получена ЭРО керосина, толщина слоя 2 мм, $W_e/W_s = 3,4$;
- ж – паста получена ЭРО циклогексана, толщина слоя 2 мм, $W_e/W_s \approx 3$

условно можно судить об уменьшении размеров наночастиц карбидов молибдена при увеличении энергии от 10,8 до 5,5 нм. Исследованно влияние введенной в проводник энергии на фазовый состав продуктов ЭВП

в пасте, полученной ЭРО керосина. На рис. 8 показано относительное содержание фаз остаточного металла и карбидов в зависимости от величины W_e/W_s .

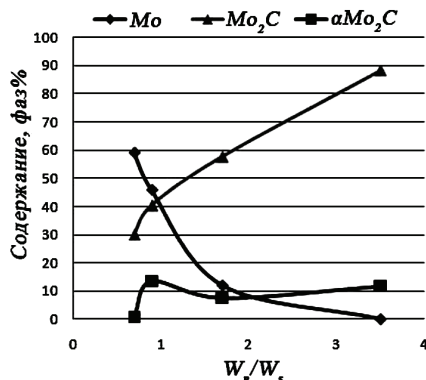


Рисунок 8 – Зависимость относительного содержания Mo , aMo_2C и Mo_2C в продуктах электрического взрыва молибденовых проводников от введенной в проводник энергии

Так как при максимальной запасаемой энергии 1,4 кДж основной фазой являются карбид Mo_2C , то эффективным режимом для его синтеза в результате ЭВ проводников радиусом $a=0,3$ мм и длиной $l=50$ мм в пасте, полученной ЭРО циклогексана, является режим $U_0=22$ кВ, $C=6$ мкФ ($W_e/W_s \approx 3$).

Синтез нанодисперсных карбидов металла методом ЭВ вольфрамовых проводников в пасте, содержащей УНМ. Удельная энергия сублимации вольфрама $W_s=315$ Дж. ЭВ вольфрамового проводника диаметром 0,2 мм (без нанесения пасты и с нанесением на его поверхность тонкого слоя пасты, полученной в результате ЭРО циклогексана) осуществляли в воздушной среде при запасаемой энергии конденсаторной батареи $W_0=432$ Дж. Временные зависимости взрыва проводников с нанесенным слоем пасты толщиной 0,2 мм и без пасты не имеют заметных отличий (см. рис. 9).

Увеличение толщины слоя пасты изменяет картину взрыва. Временные зависимости тока и напряжения ЭВ вольфрамового проводника, находящегося в капсуле с пастой (толщина слоя 2 мм) при тех же параметрах зарядного контура представлены на рис. 10. Из рис. 10 видно, что увеличивается продолжительность формирования повторного пробоя.

Для дальнейшего исследования режимов электровзрыва энергию, запасаемую конденсаторной батареей, увеличили в 2,5 раза. Осциллограмма ЭВ вольфрамового проводника в воздушной среде представлена на рис. 11.

Для такого же режима и с увеличенной запасаемой энергией, получены осциллограммы ЭВ вольфрамового проводника, находящегося в капсуле с пастой с неизменной толщиной слоя 2 мм, полученной путем ЭРО циклогексана и керосина. Характерные временные зависимости тока и напряжения представлены на рис. 12, 13.

Исследованы продукты электровзрыва вольфрамовых проводников диаметром 0,3 мм, полученные

при разных величинах запасаемой энергии – от 315 Дж до 1,58 кДж (режим с повторным пробоем без паузы тока), дифрактограммы которых представлены на рис. 14.

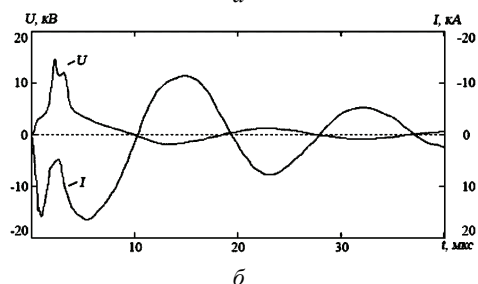
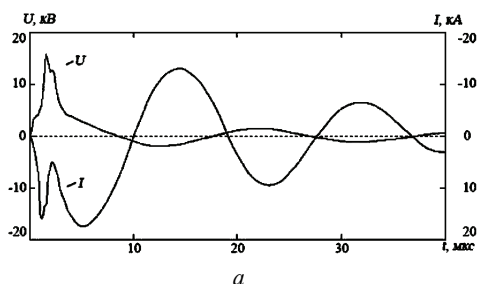


Рисунок 9 – Характерные временные зависимости тока и напряжения ЭВ вольфрамового проводника $U_0=12$ кВ; $C=6$ мкФ; $a=0,2$ мм; $l=50$ мм; $W_e/W_s=0,3$: а – без пасты, $W_e=93$ Дж, б – в пасте, полученной ЭРО циклогексана, $W_e=97$ Дж

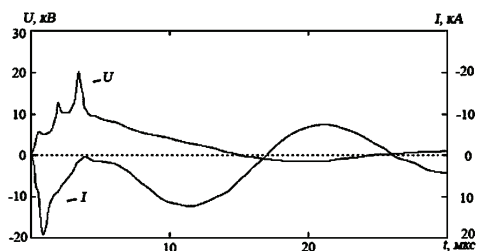


Рисунок 10 – Характерные временные зависимости тока и напряжения ЭВ проводника в пасте (толщина слоя 2 мм) $U_0=12$ кВ; $C=6$ мкФ; $a=0,2$ мм; $l=50$ мм; $W_e=180$ Дж; $W_e/W_s=0,5$

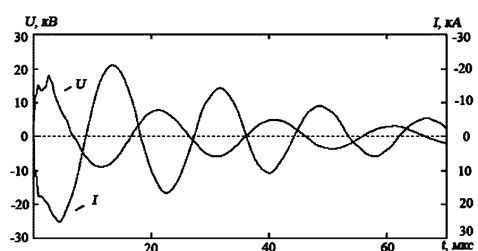


Рисунок 11 – Характерные временные зависимости тока и напряжения ЭВ вольфрамового проводника в воздушной среде $U_0=19,5$ кВ; $C=6$ мкФ; $a=0,3$ мм; $l=50$ мм; $W_e=586$ Дж; $W_e/W_s=1,8$

Как следует из сравнения дифрактограмм (см. рис. 14, з и 14, е), сильного влияния вида используемых паст на фазовый состав синтезированных карбидов не обнаружено.

Химический состав продуктов электровзрыва – вольфрам 77 %, углерод 18 %, железо 5 % (эрозия

фиксирующих электродов). На основании уширения рентгеновских максимумов (см. рис. 14, а – е), по формуле Шеррера (1) определены размеры ОКР нанокристаллов карбида вольфрама, синтезированного при использовании пасты, полученной ЭРО циклогексана. Показано, что при увеличении запасаемой энергии ОКР нанокристаллов уменьшаются от 18,8 до 5,4 нм.

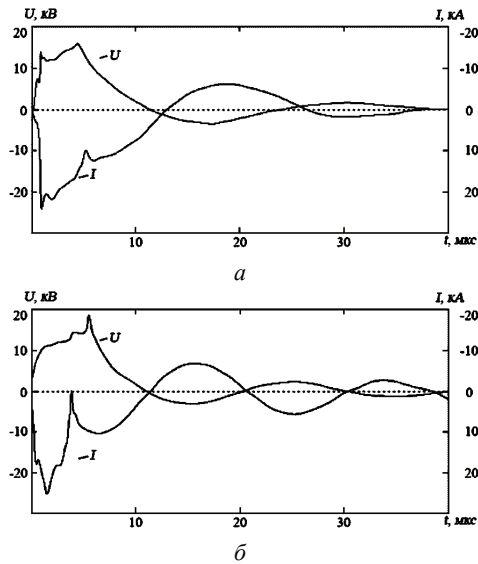


Рисунок 12 – Характерные временные зависимости тока и напряжения ЭВ вольфрамового проводника $U_0 = 19,5$ кВ; $C = 6$ мкФ; $a = 0,3$ мм; $l = 50$ мм; $W_0/W_s = 3$:
 а – паста получена ЭРО циклогексана, $W_0 = 946$ Дж;
 б – паста получена ЭРО керосина, $W_0 = 881$ Дж

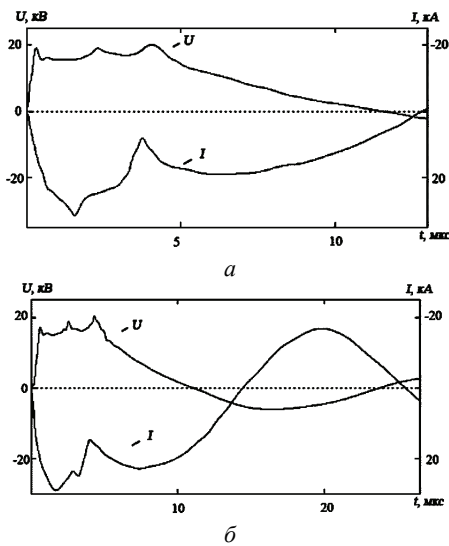


Рисунок 13 – Характерные временные зависимости тока и напряжения ЭВ вольфрамового проводника, находящегося в капсуле с углеродной пастой полученной ЭРО $U_0 = 23$ кВ; $C = 6$ мкФ; $a = 0,3$ мм; $l = 50$ мм; $W_0/W_s = 2,5$:
 а – паста получена ЭРО циклогексана, $W_0 = 885$ Дж;
 б – паста получена ЭРО керосина, $W_0 = 810$ Дж

Согласно данным рентгенофазового анализа, продукты электровзрыва вольфрамовых проводников в пастах представляют собой смесь карбидов WC_{1-x} и W_2C с примесью остаточного вольфрама, содержание

которого уменьшается с ростом введенной энергии от 40 % практически до 0 (см. рис. 15).

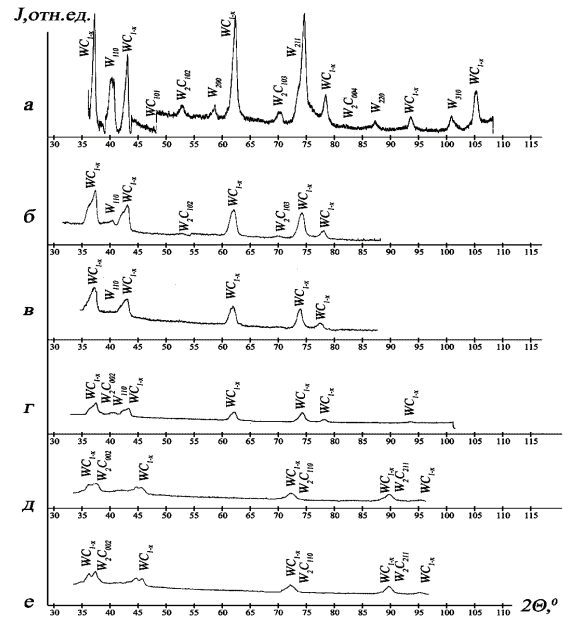


Рисунок 14 – Дифрактограммы порошковых образцов, полученных в процессе ЭВ вольфрамовых проводников в пастах при разных энергиях:

а – паста получена ЭРО циклогексана, толщина слоя 0,2 мм, $W_0/W_s = 0,3$; б – паста получена ЭРО циклогексана, толщина слоя 0,2 мм, $W_0/W_s = 1,2$; в – паста получена ЭРО циклогексана, толщина слоя 2 мм, $W_0/W_s = 1,8$; г – паста получена ЭРО керосина, толщина слоя 2 мм, $W_0/W_s = 3$; д – паста получена ЭРО керосина, толщина слоя 2 мм, $W_0/W_s = 2,5$; е – паста получена ЭРО циклогексана толщина слоя 2 мм, $W_0/W_s \approx 3$

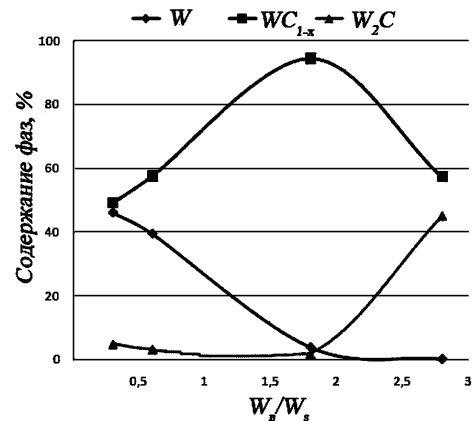


Рисунок 15 – Зависимость относительного содержания W , WC_{1-x} и W_2C в продуктах электрического взрыва вольфрамовых проводников углеводородных паст от введенной в проводник энергии

Так как при максимальной введенной в проводник энергии 1,58 кДж основной фазой являются карбиды вольфрама, то эффективным режимом для их синтеза в результате электровзрыва проводников радиусом $a = 0,3$ мм и длиной $l = 50$ мм в пасте, полученной электроразрядной обработкой циклогексана, является режим $U_0 = 23$ кВ, $C = 6$ мкФ ($W_0/W_s = 3$).

Выводы. Предложен метод синтеза нанодисперсных порошков карбидов в процессе ЭВ металлических проводников в пасте [11]. Отличительной чертой данного метода является идея использования повышенной реагентоспособности УНМ, которые содержатся в пасте, а также высокой химической активности электровзрывных наночастиц металла. Основным фактором, влияющим на фазовый и дисперсный состав синтезированных порошков карбидов, является отношение введенной энергии к энергии сублимации проводника.

Выход насыщенных углеродом фаз и дисперсность карбидов возрастает, а содержание остаточного металла в продуктах взрыва уменьшается с ростом величины энергии.

Показано, что эффективными для синтеза карбидов молибдена и вольфрама методом ЭВ проводников диаметром 0,3 мм и длиной 50 мм в пастах, содержащих УНМ, является режим с повторным пробоем без паузы тока, реализуемый при $U_0 = 23$ кВ, $C = 6$ мкФ (введенная энергия превышает энергию сублимации проводника более, чем в 2,5 раза).

Список литературы: 1. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2009. – 416 с. 2. Ma X. M. Preparation and structure of bulk nanostructured WC-Co alloy by high energy ball milling / X. M. Ma, Z. Ling, J. Gang, Y. D. Dong // J. Mater. Sci. Lett. – 1997. – 16(12). – P. 968–970. 3. Uribe R. Sub-micron sized Al_2TiO_5 powders prepared by high-energy ball milling / R. Uribe, C. Baudin, L. Mazerolles, D. Michel // J. Mater. Sci. – 2001. – 36(21). – P. 5105–5113. 4. Zhang F. L. Nanostructured WC/Co composite powder prepared by high energy ball milling / F. L. Zhang, C. Y. Wang, M. Zhu // Scripta Mater. – 2003. – 49 (11). – P. 1123–1128. 5. Hua-Min W. Synthesis of bulk and supported molybdenum carbide by a single-step Thermal carburization method / W. Hua-Min, W. Xiao-Hui, Z. Ming-Hui, D. Xiao-Yong, L. Wei, T. Ke-Yi // Chem. Mater. – 2007. – 19 (7). – P. 1801–1807. 6. Назаренко О. Б. Влияние условий синтеза на свойства электровзрывных нанопорошков карбидов металлов / О. Б. Назаренко // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306, № 6. – С. 62–66. 7. Аввакумов Е. Г. Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Аввакумов. – Новосибирск: Наука, 1988. – 297 с. 8. Механохимический синтез в неорганической химии: Сборник научных трудов / под редакцией Аввакумова Е. Г. – Новосибирск: Наука, 1991. – 224 с. 9. Kuskova N. I. Production of carbonic nanomaterials in the course of electrodischarge treatment of organic liquids / N. I. Kuskova, A. N. Yushchishina, A. P. Malyushevskaya, P. L. Tsolin, L. A. Petrichenko, A. A. Smal'ko // Surface Engineering and Applied Electrochemistry April. – 2010. – Vol. 46, Iss. 2. – P. 149–153. 10. Kuskova N. I. Dependence of the yield of carbon nanomaterials on the molecular structure of organic liquids in the process of electrodischarge treatment / N. I. Kuskova, S. V. Petrichenko, P. L. Tsolin, V. Yu. Baklar' // Surface Engineering and Applied Electrochemistry February. – 2013. – Vol. 49, Issue 1. – P. 13–18.

11. Пат. 95781 Україна, МПК(2015.01) C01B 31/30(2006.01), V82B3/00. Спосіб одержання нанопорошків карбідів тугоплавких металів / Терехов А. Ю., Цолин П. Л., Кускова Н. І., Баклар В. Ю., Зубенко О. О. (Україна); заявник і патентовласник Ін-т імпульсних процесів і технологій НАН України. – № У 201407028; заявл. 23.06.14; опубл. 12.01.2015, Бюл. №1. – 4 с. 12. Булгаков А. В. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество / А. В. Булгаков, Н. М. Булгакова, И. М. Бураков. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. – 462 с. 13. Альмяшева О. В. Размер, морфология и структура частиц нанопорошка диоксида циркония, полученного в гидротермальных условиях / О. В. Альмяшева, Б. А. Федорова, А. В. Смирнов, В. В. Гусаров // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 26–36.

Bibliography (transliterated): 1. Gusev A. I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii. A. I. Gusev. Moscow: Fizmatlit, 2009. 416 Print. 2. Ma X. M., Ling Z., Gang J., Dong Y. D. Preparation and structure of bulk nanostructured WC-Co alloy by high energy ball milling. J. Mater. Sci. Lett. 1997; 16(12): 968–970 Print. 3. Uribe R., Baudin C., Mazerolles L., Michel D. Sub-micron sized Al_2TiO_5 powders prepared by high-energy ball milling. J. Mater. Sci. 2001; 36(21) : 5105–5113 Print. 4. Zhang F. L., Wang C. Y., Zhu M. Nanostructured WC/Co composite powder prepared by high energy ball milling. Scripta Mater. 2003; 49 (11): 1123–1128 Print. 5. Hua-Min W., Xiao-Hui W., Ming-Hui Z., Xiao-Yong D., Wei L., Ke-Yi T. Synthesis of bulk and supported molybdenum carbide by a single-step Thermal carburization method. Chem. Mater., 2007, 19 (7), 1801–1807 Print. 6. Nazarenko O. B. Vliyanie uslovij sinteza na svojstva elektrovzryvnyh nanoporoshkov karbidov metallov. O. B. Nazarenko. Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2003. Vol. 306, No 6. 62–66 Print. 7. Avvakumov E. G. Mehanicheskie metody aktivacii himicheskikh processov. Novosibirsk: Nauka, 1988. 297 Print. 8. Mehanohimicheskij sintez v neorganicheskoj himii: Sbornik nauchnyh trudov. pod redakciej Avvakumova E.G. Novosibirsk: Nauka, 1991. 224 Print. 9. Kuskova N. I. Production of carbonic nanomaterials in the course of electrodischarge treatment of organic liquids. N. I. Kuskova, A. N. Yushchishina, A. P. Malyushevskaya, P. L. Tsolin, L. A. Petrichenko, A. A. Smal'ko. Surface Engineering and Applied Electrochemistry April 2010, Vol. 46, Iss. 2. 149–153 Print. 10. Kuskova N. I. Dependence of the yield of carbon nanomaterials on the molecular structure of organic liquids in the process of electrodischarge treatment. N. I. Kuskova, S. V. Petrichenko, P. L. Tsolin, V. Yu. Baklar'. Surface Engineering and Applied Electrochemistry February 2013, Vol. 49, Iss. 1. 13–18 Print. 11. Pat. 95781 Ukrayina, MPK(2015.01) S01V 31/30(2006.01), V82B3/00. Sposib oderzhannya nanoporoshkiv karbidiv tuhoplavkykh metaliv. Terekhov A. Yu., Tsolin P. L., Kuskova N. I., Baklar V. Yu., Zubenko O. O. (Ukrayina); zayavnyk i patentovlasnyk In-t impul'snykh protsesiv i tekhnolohiy NAN Ukrayiny.- No u 201407028; zayavl. 23.06.14; opubl. 12.01.2015, Byul. No 1. 12. Bulgakov A. V. Sintez nanorazmernih materialov pri vozdeystvii moshnyh potokov energii na veshhestvo. A. V. Bulgakov, N. M. Bulgakova, I. M. Burakov. Novosibirsk: Institut teplofiziki SO RAN, 2009. 462 Print. 13. Al'mjasheva O. V. Razmer, morfologija i struktura chastic nanoporoshka dioksida cirkonija, poluchennogo v gidrotermal'nyh uslovijah. O. V. Al'mjasheva, B. A. Fedorova, A. V. Smirnov, V. V. Gusarov. Nanasistemy: Fizika, Himija, Matematika. 2010. Vol. 1, No 1. 26–36 Print.

Поступила (received) 26.06.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Цолин Павел Леонидович, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної Академії Наук України, молодший науковий співробітник; тел.: (093) 375–05–44; email: tsolinpasha@gmail.com.

Tsolin Pavel Leonidovich, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, postgraduate student; tel.: (067) 514–77–78; email: tsolinpasha@gmail.com.

Терехов Анатолий Юрьевич, Інститут імпульсних процесів і технологій Національної Академії Наук України, молодший науковий співробітник; тел.: (093) 764–74–06; email: iiptnan@gmail.com.

Terekhov Anatolij Yur evich, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, postgraduate student; tel.: (093) 764–74–06; email: iiptnan@gmail.com.

УДК 537.52:542.9:661.66

Д. И. ЧЕЛПАНОВ, Н. И. КУСКОВА, А. А. СМАЛЬКО**РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНАЯ ИНИЦИАЦИЯ ПРОЦЕССОВ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В НЕКОТОРЫХ ПОРОШКОВЫХ СИСТЕМАХ**

Рассчитаны параметры разрядноимпульсной инициации процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в системах порошков составами алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + композит Ф4К20. Проведены экспериментальные исследования некоторых закономерностей и основных параметров разрядноимпульсной инициации самораспространяющегося синтеза в выбранных порошковых системах. Приведены дифрактограммы синтезированных порошков.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, разрядноимпульсная инициация, алюминий, политетрафторэтилен, углеродные наноматериалы

Введение. Значительный интерес научного сообщества к исследованию способов получения, структуры и свойств наноразмерных систем обусловлен многообразием вариантов их практического применения. Малый размер структурных составляющих – до 100 нм – определяет значительные различия в свойствах наноматериалов от их макро-аналогов [1-3]. Несмотря на научную и практическую ценность углеродных наноматериалов (УНМ), их массовое производство сдерживается несовершенством основных методов синтеза (малый выход УНМ, необходимость химической очистки и сложность технологического процесса) для эффективного использования в промышленности. Проблема увеличения производительности синтеза, выхода и уменьшения энергозатрат остается актуальной.

Анализ предварительных исследований и литературы. Широкое применение для получения ценных в практическом отношении композитов металлов [4], карбидов [5], боридов [6], нитридов, оксидов и гидридов [7] нашел самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). СВС-метод основан на химических реакциях, протекающих внутри узкой высокотемпературной зоны (от 1000 К до 3000 К), которая распространяется в исходной системе порошков, состоящей из мелкодисперсной фракции окислителя и восстановителя [8]. Не так давно было обнаружено, что СВС-реакции могут также приводить к формированию УНМ и их производных: наночастиц [9], углерод-инкапсулированных магнитных наночастиц [10], многослойного графита [11], нановолокон и нанотрубок [11-13], мелкодисперсной углеродной сажи [14].

Условия получения порошка наноуглерода в режиме СВС (инертная атмосфера, высокие температуры, исходное сырье и т.д.) отличаются от промышленных условий производства порошкообразного аморфного углерода, в связи с чем появляется возможность получения иной модификации этого элемента [15].

Предварительная обработка шихты, состав системы начальных порошковых реагентов и условия инициации высокоэкзотермичной реакции синтеза играют основную роль в реализации процесса СВС, поэтому исследованию их влияния на закономерности горения СВС-систем предоставляется первоочередное

значение, в частности, решению вопроса выбора соответствующих реагентов и условий реакции.

Важным фактором при выборе источника зажигания может служить то, что температура зажигания является функцией энергии активации и нескольких кинетических переменных [16]. На температуру шихты перед зажиганием влияют следующие процессы: начальный нагрев, при котором весь объем шихты нагревают до определенной температуры до начала СВС; прединициационный нагрев, вызванный передачей тепла от источника нагрева образца до начала реакции; предволновой нагрев, возникающий в результате передачи тепла от фронта волны нагрева к образцу во время реакции [17]. Прединициационный нагрев отличается от начального тем, что является нестационарным процессом передачи тепла через шихту в виде теплового градиента в локальной области перед ее зажиганием. Так как изменение температуры зажигания существенно влияет на параметры процесса СВС (включая результирующую температуру реакции, от которой зависит качественный и количественный состав получаемого продукта), и то, что начальный и предволновой нагревы определяются, в большей мере, соответственно, начальными параметрами пред-СВС обработки (нагрев системы порошков в печи) и состава шихты (удельная электропроводность отдельных компонентов), нами предлагается использование разрядноимпульсной инициации процесса СВС как метода влияния на стадию прединициационного нагрева с целью уменьшения его влияния при сохранении стабильности поджига смеси.

Целью работы является использование разрядноимпульсной инициации процесса СВС в выбранных исходных системах порошков.

Системы порошков для СВС наноуглерода. Предложенные в работе [15] системы для синтеза наноуглерода имеют характеристики, необходимые для проведения СВС-процесса, поэтому могут быть использованы для экспериментальной реализации процесса.

Для реализации СВС нами была выбрана система порошковых реагентов алюминий – политетрафторэтилен ($Al - (-C_2F_4)_n$), имеющая следующие преимущества:

1. высокая расчетная адиабатическая температура

и энтальпия;

2. удобный в применении порошок политетрафторэтилена (не взрывоопасен, не ядовит, есть вероятность получения нанокластеров углерода при взаимодействии фтора и алюминия с освобождением атомов углерода);

3. низкая температура плавления порошка алюминия (660°C) позволяет осуществлять более стабильную инициацию СВС при меньшей требуемой температуре, чем для других систем.

Также нами был исследован процесс СВС в системе алюминий – композит Ф4К20 (политетрафторэтилен + кокс (20 %)), применение которого предложено для увеличения массовой доли углерода в изначальной шихте, и, соответственно, увеличения выхода нанокластеров углерода. Дополнительно с целью замедления реакции СВС были проведены исследования по добавлению в состав изначальной шихты 5 % KCl.

Для выбранных систем СВС образцы для экспериментов готовились из смеси порошков с мольным отношением реагентов, соответствующим стехиометрическим уравнениям химических реакций (в нашем случае, $4\text{Al} + 3\text{C}_2\text{F}_4 = 4\text{AlF}_3 + 6\text{C}$).

Разрядноимпульсная инициация СВС

Для исследования процесса разрядноимпульсной инициации СВС нами был разработан соответствующий электроразрядный контур (рис. 1).

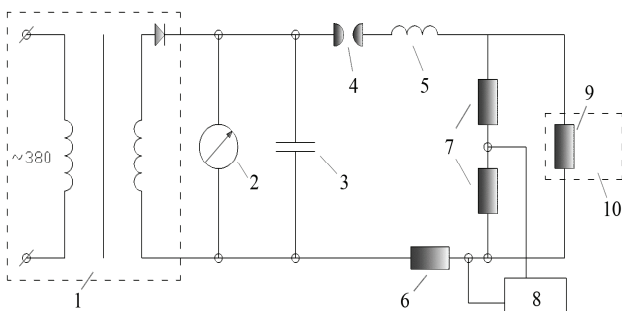


Рисунок 1 – Электроразрядный контур инициации процесса СВС: 1 – высоковольтный трансформатор, запитанный от сети напряжением $\sim 380\text{ В}$; 2 – индикационный киловольтметр; 3 – батарея конденсаторов; 4 – управляемый воздушный разрядник; 5 – катушка индуктивности; 6 и 7 – измерительный шунт и делитель напряжения, подключенные к осциллографу; 9 – металлическая проволока, расположенная в технологическом узле 10

В работах [15] и [18], являющихся теоретическим базисом наших исследований, не приведен расчет температуры инициации (поджига) порошковых систем. Температуры поджига измерена де факто в процессе синтеза с применением термопар и видеорегистраторов. В большинстве остальных работ вопрос температуры инициации был или опущен вовсе, или частично раскрыт только для не интересующих нас на данном этапе порошковых систем. Основываясь на необходимости получения приблизительной температуры инициации для искомых порошковых смесей, нами были рассчитаны параметры иницирующей

проволоки при заданных параметрах электроразрядного контура (табл. 1).

Таблица 1 – Расчетные параметры температуры нагрева проволоки

Материал проволоки	C , мкФ	L , мкГн	T , мс	U_p , кВ	r , мм	ΔT_m , К
нихром	1080	33,8	1,2	1,1	1,2	630
нихром	1080	33,8	1,2	1,5	1,2	1172
вольфрам	1080	33,8	1,2	0,5	0,3	1065
вольфрам	1080	33,8	1,2	0,5	0,2	1941

В табл. 1 L – общая индуктивность разрядного контура с учетом дополнительной катушки индуктивности, добавленной для увеличения длительности разряда; T – расчетный период разряда; U_p – разрядное напряжение на момент срабатывания разрядника; r – радиус металлической иницирующей проволоки в виде спирали; ΔT_m – максимальная расчетная температура, которую может достичь иницирующая проволока в момент разряда, без учета теплопотерь.

Дальнейший выбор параметров разрядноимпульсной инициации (U_p, r) основывался на том, что при некоторых критических значениях напряжения, радиуса и длины проволоки может происходить ее испарение, что может приводить к нежелательным последствиям (отсутствие зажигания порошковой системы, смещение или частичное разрушение капсулы с шихтой под воздействием волн давления от взрыва проводника). Для экспериментов были выбраны нихромовая проволока радиусом 1,2 мм и вольфрамовая проволока радиусом 0,3 мм.

Также перед началом непосредственных исследований были разработаны и протестированы различные варианты конструкции капсулы, содержащей исходную порошковую шихту нужной степени компактирования. Для уменьшения количества примесей в получаемом продукте, простоты и доступности использования, было предложено использование капсулы из кварцевого стекла различного диаметра и толщины.

Далее были проверены основные способы подвода энергии к шихте от иницирующей спирали: торцовый, продольный и внешний (рис. 2).

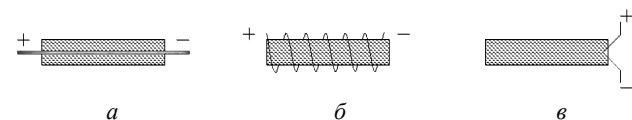


Рисунок 2 – Способы подвода энергии к исходному образцу при СВС

Недостатком продольного способа (рис. 2, а) подвода тепла, который заключается в расположении иницирующей спирали по оси образца, является сложность в видеорегистрации волны горения в случае волнового СВС и высокая вероятность возникновения явления взрывного горения, при котором процесс СВС происходит практически одновременно во всем объеме образца. Внешний способ (рис. 2, б) также не подходит по специфике нашего исследования, а именно ввиду использования кварцевой трубки в ка-

честве капсулы и появления неизбежных теплопотерь на стенках капсулы и увеличения времени задержки начала СВС. При торцовом способе (рис. 2, в) происходит передача тепла непосредственно на ограниченный участок шихты и стабильная инициация процесса СВС при правильно подобранных начальных параметрах, потому был выбран торцовый метод.

Отличительной особенностью процесса СВС в системе порошков $Al-(C_2F_4)_n$, описанной в [15], является то, что фронт горения, проходя по образцу, не оставляет за собой спеченного вещества, так как целевой продукт разлетается по всему объему технологического узла. Также наблюдается очень сильное повышение скорости распространения фронта реакции, что делает небезопасным проведение процесса синтеза в относительно больших объемах. Потому нами предлагается применение водной среды для наполнения технологического узла с целью уменьшения разлета конечного синтезированного продукта и упрощения его сбора.

Немаловажным фактором при СВС нанопорошков является предсинтезная обработка порошковых реагентов и подготовка исходной шихты. Производимое измельчение компонентов шихты и просеивание мелкой фракции позволяет получать систему с порошками необходимого размера, тогда как предварительной просушкой реагентов достигается дополнительное очищение от примесей. Как указывалось выше, изменение плотности шихты также может влиять как на общую эффективность СВС (температуры зажигания, скорость реакции), так и на конструкцию самого образца системы порошков – при достаточной пресовке достигается сохранение цилиндрической формы образца и без применения внешней капсулы. Отсутствие капсулы приводит к изменению условий СВС.

Проанализировав полученные теоретические и экспериментальные данные, нами был разработан и сконструирован следующий вариант технологического узла лабораторной установки разрядноимпульсного иницирования СВС (рис. 3).

Разработанный технологический узел имеет в основе следующий принцип работы: подготовленную из порошковых реагентов шихту (спрессованную до определенной плотности или помещенную в капсулу) располагают в специальной ячейке, после чего к торцу образца подводят до точечного контакта иницирующую спираль (вольфрамовую или ни хромовую проволоку, предварительно закрепленную в токоведущих электродах). Далее камера с образцом герметично закрывается и заполняется дистиллированной водой через подводящую трубку. После успешной инициации и окончания СВС процесса, камеру раскрывают, капсулу извлекают из ячейки и, в случае продолжения эксперимента, устанавливают новый образец.

После окончания эксперимента, воду с содержащимся в ней получаемым продуктом сливают и фильтруют на вакуум-фильтровальной установке, после чего нанопорошок собирают и просушивают. Далее проводят экстракцию фуллеренов из получаемого

продукта в неполярном растворителе (бензол, толуол) по методике, предложенной в [15].



Рисунок 3 – Технологический узел лабораторной установки разрядноимпульсной инициации СВС

Отработка методики разрядноимпульсного иницирования процесса СВС УНМ

Экспериментальные исследования выбранных СВС-систем подтвердили результаты теоретических расчетов: реализация синтеза возможна в обеих системах СВС при параметрах, близких к расчетным ($U_p \approx 450$ В, вольфрамовая иницирующая спираль $r = 0,3$ мм и $l = 200$ мм как наиболее оптимальных с точки зрения стабильности зажигания шихты и сохранения структуры проволоки).

На рис. 4 показана покадровая съемка иницированного при помощи разряда на вольфрамовую проволоку радиусом 0,3 мм СВС процесса в кварцевой капсуле внутренним диаметром 3 мм и длиной 70 мм, заполненной шихтой составом алюминий + политетрафторэтилен. В углу каждого кадра указано время в секундах от начала инициации процесса горения. После разряда на вольфрамовую спираль длительностью $\sim 1,1$ мс и задержки менее 33 мс, во время которой происходит прогревание иницируемой зоны, шихта ярко загорается и переходит в режим СВС горения.

На кадрах в моменты времени 0,73 с и 1 с особенно заметен разлет получаемого продукта через верхний торец капсулы, который при дальнейшем перемещении волны горения вглубь образца становится все менее выраженным, вплоть до полного исчезновения. Перемещение волны горения, как видно на последующих кадрах (начиная с 1,27 с) и на рис. 5, позволяет рассчитывать некоторые важные параметры СВС: длительность процесса, линейную скорость горения и длину волны горения.

Далее были рассчитаны следующие основные параметры, характеризующие процесс СВС – ширина зоны прогрева x_m , время реакции в волне t_p , время нагревания вещества в волне t_m и скорость нагревания

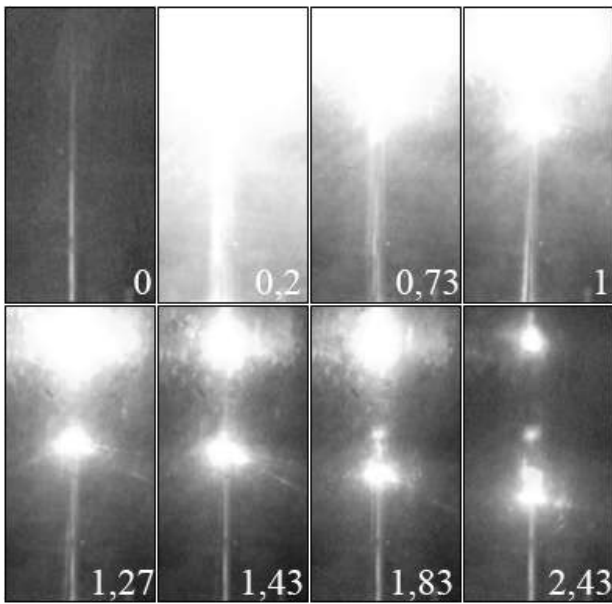


Рисунок 4 – СВС процесс шихты состава алюминий + политетрафторэтилен

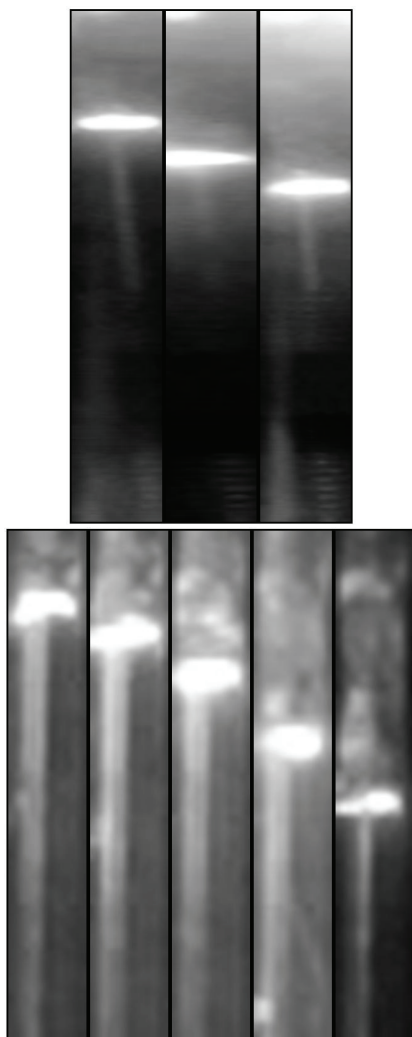


Рисунок 5 – Перемещение волны горения в различных образцах СВС-систем

вещества в волне W , используя расчетные формулы, указанные в [18]:

$$x_m = a/u; \tag{1}$$

$$t_m = x_m/u; \tag{2}$$

$$t_p = (L_e - x_m)/u; \tag{3}$$

$$W = (T_2 - T_0)/t_m, \tag{4}$$

где a – температуропроводность образца, u – линейная скорость горения, L_e –длина волны горения, T_0 – начальная температура шихты, T_2 – температура горения в максимальной точке профиля температур.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных и результаты расчетов по формулам (1) – (4) приведены в табл. 2.

Результаты рентгенофазового анализа образцов исходной шихты и получаемого продукта систем алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + композит Ф4К20 приведены на рис. 6 (а и б, соответственно).

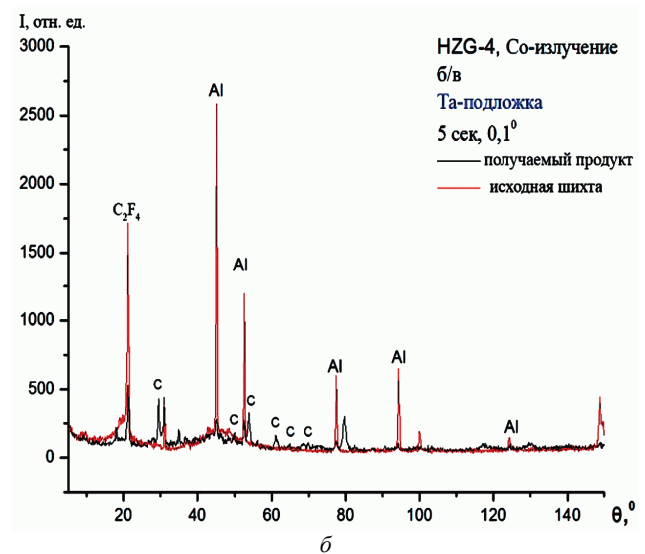
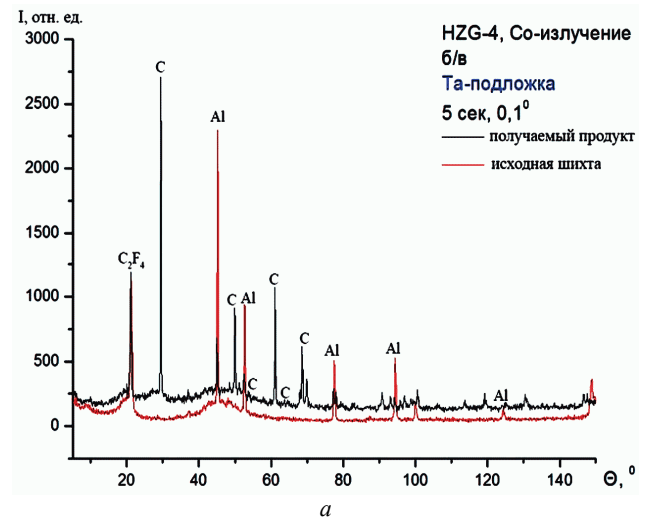


Рисунок 6 – Дифрактограммы образцов исходной шихты и получаемого продукта СВС систем алюминий + политетрафторэтилен (а) и алюминий + композит Ф4К20 (б)

Таблица 2 – Параметры процесса СВС в выбранных порошковых системах

Система	Al – (-C ₂ F ₄) _h	Al – (-C ₂ F ₄) _h + KCl (5%)	Al – (-C ₂ F ₄) _h	Al – (-C ₂ F ₄) _h + KCl (5%)	Al – (-C ₂ F ₄) _h	Al + Ф4К20
Материал спирали	ни-хром	ни-хром	ни-хром	ни-хром	вольфрам	вольфрам
Диаметр образца $d_{пор}$, мм	6	6	3	3	3	3
Длина образца $l_{пор}$, мм	50	60	80	80	70	70
Температура зажигания T_3 , К	1020	1060	1030	1070	1040	1030
Температура горения T_2 , К	2650	2630	2740	2730	2740	2730
Длительность процесса t_{np} , с	1,6	2,23	2,8	2,9	3,41	3,05
Линейная скорость горения u , мм/с	36,46	25,44	29,8	26,6	28,63	29,56
Ширина зоны прогрева x_m , мм	0,61	0,88	0,75	0,84	0,78	0,71
Общая длина волны $L_в$, мм	3,7	2,2	2,5	3,3	2,7	3,1
Время реакции в волне t_p , с	0,08	0,05	0,06	0,09	0,07	0,08
Время нагревания вещества в волне $t_m \cdot 10^2$, с	1,68	3,46	2,52	3,16	2,73	2,42
Скорость нагревания вещества в волне $W \cdot 10^{-4}$, К/с	13,98	6,75	9,7	7,7	8,95	10,07

Выводы. Использование разрядноимпульсного контура позволяет производить заживание процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в системах порошков составом алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + композит Ф4К20.

По результатам теоретических расчетов параметров инициации СВС, была разработана и сконструирована лабораторная установка, которая позволила исследовать некоторые закономерности заживания СВС процессов в выбранных порошковых системах импульсным разрядом при параметрах контура $U_p = 1,5$ кВ, $C = 1080$ мкФ, $L = 33,8$ мкГн на нихромовую проволоку радиусом 1,25 мм и при параметрах контура $U_p = 0,5$ кВ, $C = 1080$ мкФ, $L = 33,8$ мкГн на вольфрамовую проволоку радиусом 0,3 мм. Результаты теоретических расчетов параметров заживания СВС были подтверждены экспериментально.

Экспериментально определены основные параметры процесса СВС выбранных порошковых систем: температура зажигания $T_3 \approx 1050$ К; линейная скорость горения $U \approx 30$ мм/с; ширина зоны прогрева $x_m \approx 0,75$ мм; общая длина волны горения $L_в \approx 2,8$ мм; время реакции в волне $t_p \approx 0,07$ с и скорость нагревания вещества в волне $W \approx 10,7 \cdot 10^4$ К/с.

Качественных различий в процессе синтеза для выбранных порошковых систем обнаружено не было, количественные параметры синтеза отличаются не существенно (менее 15 % для основных параметров скоростей и времен). Добавление в состав шихты KCl привело к уменьшению скоростей горения (от 20 до 50 % для капсулы внутренним диаметром 6 мм и от 10 до 20 % – для капсулы внутренним диаметром 3 мм).

Результаты рентгенофазового анализа показали, что большая часть исходных порошков вступила в СВС-реакцию с образованием УНМ.

Список литературы: 1. Drexler K. E. Nanosystems: molecular machinery, manufacturing and computation / K. E. Drexler // NewYork: JohnWiley&Sons, Inc. – 1992. 2. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения / Под ред. П. П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2008. 3. Smith W. F. Foundations of materials science and engineering / W. F. Smith, J. Hashemi // 5th Edition McGraw-Hill. – 2010. 4. Garret W. Die castable Aluminum Metal Matrix Composites by Self-propagating High-temperature Synthesis / W. Garret, J. Nuechterlein, I. Jo, A. Munitz, M. J. Kaufman, J. J. Moore // Society of Die Casting Engineers. – 2012. – Vol. 55. 5. Garret W. Control of Self-propagating High-temperature Synthesis Derived Aluminum-Titanium Carbide Metal Matrix Composites, Golden: PhD thesis / Garret W. – Colorado School of Mines, 2012. 6. Абдулкаримова Д. С. Получение боридных композитов методом СВС / Д. С. Абдулкаримова, И. М. Вонгай, З. А. Мансуров, О. Одава-ра // Межд. симпозиум «Физика и химия углеродных материалов / Наноинженерия». – Алматы, 2010. – С. 116-118. 7. Varma A. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications / A. Varma, A. Rogachev, A. Mukasyan et al. // Advanced Chemical Engineering. – 1998. – Vol. 24. – P. 78-226. 8. Bystrzejewski M. Self-sustaining high-temperature synthesis of carbon-encapsulated magnetic nanoparticles from organic and inorganic metal precursors / M. Bystrzejewski, M. Szala, W. Kicinski, W. Kaszuwara, M.H. Rummeli, T. Gemming, A. Huczko // New Carbon Materials. – Apr., 2010. – Vol. 25, № 2. – P. 81-88. 9. de Basi R. Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles using combustion waves / R. de Basi, A. Figueiredo, A. Fernandes et al. // Solid State Communications. – 2007. – Vol. 144. – P. 15-17. 10. Bystrzejewski M. Carbon-encapsulated magnetic nanoparticles spontaneously formed by thermolysis route / M. Bystrzejewski, A. Huczko, H. Lange et al. // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2008. – Vol. 16. – P. 217-230. 11. Szala M. Combustion synthesis of hollow carbon fibers / M. Szala // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2008. – Vol. 17. – P. 106-111. 12. Huczko A. Combustion synthesis as a novel method for production of 1-D SiC nanostructures / A. Huczko, M. Bystrzejewski, H. Lange et al. // Journal of Physical Chemistry B. – 2005. – Vol. 109. – P. 16244-16251. 13. Huczko A. A self-assembly SHS approach to form silicon carbide nanofibers / A. Huczko, M. Osica, A. Rutkowska et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2007. – Vol. 19. – P. 395022. 14. Нажиткызы М. Получение супергидрофобной углеродной поверхности при горении пропана / М. Нажиткызы, З. А. Мансуров, И. К. Пури, Т. А. Шабанова, И. А. Цыганова. – Нефть и газ, 2010. – № 5 (59). – С. 27-33. 15. Амосов А. П. О возможности получения наноуглерода при химико-конденсационном горении порошковых смесей / А. П. Амосов, Ю. М. Марков, С. М. Ахметсагиров, Г. В. Бичуров // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 107-113. 16. Wang T. Activation Energy of Self-Heating Process Studied by DSC / T. Wang, R. Y. Liu, M. L. Zhu and J. S. Zhang // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2002. – Vol. 70. – P. 507-519. 17. Nuechterlein J. Production of Ceramic Nanoparticles Through Self-propagating High-temperature Synthesis (SHS) and Their Introduction Into a Metallic Matrix to Form Metal Matrix Composites (MMC) / J. Nuechterlein // Colorado School of Mines. Department of Metallurgical and Materials Engineering. – 2013. – P. 76. 18. Амосов А. П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: Учеб. пособие / А. П. Амосов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов. Под научной редакцией В. Н. Анциферова. – М.: Машиностроение-1, 2007.

- Bibliography (transliterated):** 1. Drexler K. E. Nanosystems: molecular machinery, manufacturing and computation. K. E. Drexler. New York: John Wiley & Sons, Inc. – 1992. Print. 2. Nanotehnologii. Nanomaterialy. Nanosistemnaja tehnika. Mirovye dostizhenija. Pod red. P. P. Mal'ceva. Moscow: Tehnosfera, 2008. Print. 3. Smith W. F. Foundations of materials science and engineering. W. F. Smith, J. Hashemi. 5th Edition McGraw-Hill. 2010. Print. 4. Garret W. Die castable Aluminum Metal Matrix Composites by Self-propagating High-temperature Synthesis. W. Garret, J. Nuechterlein, I. Jo, A. Munitz, M. J. Kaufman, J. J. Moore. Society of Die Casting Engineers. – 2012. – Vol. 55. Print. 5. Garret W. Control of Self-propagating High-temperature Synthesis Derived Aluminum-Titanium Carbide Metal Matrix Composites, Golden: PhD thesis. Garret W. Colorado School of Mines, 2012. Print. 6. Abdulkarimova D. S. Poluchenie boridnyh kompozitov metodom SVS. D. S. Abdulkarimova, I. M. Vongaj, Z. A. Mansurov, O. Odavara. Mezhd. simpozium «Fizika i himija uglerodnyh materialov. Nanoizhenerija». Almaty, 2010. 116-118. Print. 7. Varma A. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications. A. Varma, A. Rogachev, A. Mukasyan, et al. Advanced Chemical Engineering. 1998. Vol. 24. 78-226. Print. 8. Bystrzejewski M. Self-sustaining high-temperature synthesis of carbon-encapsulated magnetic nanoparticles from organic and inorganic metal precursors. M. Bystrzejewski, M. Szala, W. Kicinski, W. Kaszuwara, M.H. Rummeli, T. Gemming, A. Huczko. New Carbon Materials. Apr., 2010. Vol. 25, № 2. 81-88. Print. 9. de Basi R. Synthesis of cobalt ferrite nanoparticles using combustion waves. R. de Basi, A. Figueiredo, A. Fernandes et al. Solid State Communications. 2007. Vol. 144. 15-17. Print. 10. Bystrzejewski M. Carbon-encapsulated magnetic nanoparticles spontaneously formed by thermolysis route. M. Bystrzejewski, A. Huczko, H. Lange et al. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2008. Vol. 16. 217-230. Print. 11. Szala M. Combustion synthesis of hollow carbon fibers. M. Szala. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2008. Vol. 17. 106-111. Print. 12. Huczko A. Combustion synthesis as a novel method for production of 1-D SiC nanostructures. A. Huczko, M. Bystrzejewski, H. Lange et al. Journal of Physical Chemistry B. 2005. Vol. 109. 16244-16251. Print. 13. Huczko A. A self-assembly SHS approach to form silicon carbide nanofibers. A. Huczko, M. Osica, A. Rutkowska et al. Journal of Physics: Condensed Matter. 2007. Vol. 19. 395022. Print. 14. Nazhipkyzy M. Poluchenie supergidrofobnoj uglerodnoj poverhnosti pri gorenii propana. M. Nazhipkyzy, Z. A. Mansurov, I. K. Puri, T. A. Shabanova, I. A. Cyganova. Neft' igaz, 2010. № 5 (59). 27-33. Print. 15. Amosov A. P. O vozmozhnosti poluchenija nanougleroda pri himiko-kondensacionnom gorenii poroshkovykh smesej. A. P. Amosov, Ju. M. Markov, S. M. Ahmetsagirov, G. V. Bichurov. Vestnik Samar'skogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Ser.: Tehničeskije nauki. 2007. № 1. 107-113. Print. 16. Wang T. Activation Energy of Self-Heating Process Studied by DSC. T. Wang, R. Y. Liu, M. L. Zhu and J. S. Zhang. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2002. Vol. 70. 507-519. Print. 17. Nuechterlein J. Production of Ceramic Nanoparticles Through Self-propagating High-temperature Synthesis (SHS) and Their Introduction Into a Metallic Matrix to Form Metal Matrix Composites (MMC). Jacob Nuechterlein, Colorado School of Mines. Department of Metallurgical and Materials Engineering. Colorado School of Mines. 2013. 76. Print. 18. Amosov A. P. Poroshkovaja tehnologija samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza materialov: Ucheb. posobie. A. P. Amosov, I. P. Borovinskaja, A. G. Merzhanov. Pod nauchnojredakciej V. N. Anciferova. Moscow: Mashinostroenie-1, 2007. Print.

Поступила (received) 19.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Челпанов Дмитрий Ильич, Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, аспирант; тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Chelpanov Dmitry Illych, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, postgraduate student; tel.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Кускова Наталья Ивановна, доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electro-physical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Смалько Анатолий Александрович, Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, инженер; тел.: (096) 583-04-69.

Smalko Anatolij Aleksandrovich, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, engineer; tel.: (096) 583-04-69.

УДК 53.088.24

С. Ю. ШЕВЧЕНКО, В. В. ВОЛОХІН, С. М. ЛЕБЕДКА, І. М. ДЯГОВЧЕНКО, М. В. КАЧАН

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДХИЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ ТА ЧАСТОТИ НА ПОКАЗИ ПРИБАДІВ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Електричну напругу та частоту розглянуто як величини, які носять випадковий характер і підкорюються Гаусівському закону розподілу. За допомогою статистичних методів аналізу даних розглянуто, як впливає відхилення напруги і частоти в межах, що нормуються ГОСТ 13109-97, та поза цими межами на покази приладів обліку електричної енергії. Зроблено висновки щодо доцільності регулювання частоти та напруги в електричних мережах.

Ключові слова: напруга, частота, прилад обліку, лічильник, електрична енергія, мережа, опір, індуктивність, ємність, математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення.

Вступ. Залежно від виду використовуваного устаткування, навантаження підрозділяється на активне, індуктивне і ємнісне. Найбільш часто електроспоживачі мають змішане активно-індуктивне навантаження. Відповідно, з електричної мережі відбувається споживання як активної, так і реактивної енергії.

Для вимірювання електричної енергії в системах електропостачання в даний час застосовуються як індукційні, так і електронні лічильники електроенергії.

При цьому покази індукційних лічильників активної і реактивної енергії практично не залежать від наявності вищих гармонік і постійної складової струму і/або напруги. Обертаючий момент, що діє на ротор, який знаходиться в обертовому магнітному полі, чи сила, що впливає на якір (диск), що знаходиться в рухомому магнітному полі, пропорційні діючому значенню перших гармонік напруги та/або струму, які створюють це поле [5].

Вплив інших гармонік або відсутній (наприклад, 3-я та 9-а гармоніки), або дуже малий [5]. Звідси впливає, що покази активного індукційного лічильника пропорційні активній потужності перших гармонік струму і напруги навантаження:

$$P = U_{(1)} \cdot I_{(1)} \cdot \cos \varphi_{(1)} = P_{(1)} \cdot t, \quad (1)$$

де $U_{(1)}$ – діюче значення першої гармоніки напруги; $I_{(1)}$ – діюче значення першої гармоніки струму; $\cos \varphi_{(1)}$ – коефіцієнт потужності першої гармоніки; $P_{(1)}$ – активна потужність першої гармоніки; t – поточний час.

Однофазні реактивні лічильники, що працюють за індуктивним принципом, реалізуються за допомогою схеми 90-градусного зсуву. Реактивні прилади обліку електроенергії для трифазних мереж реалізуються шляхом включення кіл напруги на різні фази [7]. Звідси впливає, що покази індукційного лічильника електроенергії пропорційні реактивній потужності першої гармоніки напруги та першої гармоніки струму:

$$Q = U_{(1)} \cdot I_{(1)} \cdot \sin \varphi_{(1)} = Q_{(1)} \cdot t, \quad (2)$$

де $Q_{(1)}$ – реактивна потужність першої гармоніки.

У формулі (1) коефіцієнт потужності може бути визначений як:

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}, \quad (3)$$

де R – активний опір електричного кола, Ом; X_L – реактивний індуктивний опір кола, Ом; X_C – реактивний ємнісний опір кола.

Величина $\sin \varphi$ може бути визначена як:

$$\sin \varphi = \frac{(X_L - X_C)}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (4)$$

Реактивний індуктивний та реактивний ємнісний опір залежать від величин індуктивності L та ємності C відповідно та від частоти в електричній мережі f . Від перелічених параметрів, в свою чергу, напругу залежать значення $\cos \varphi$ та $\sin \varphi$. Запишемо для них аналітичні вирази (5) та (6).

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L; \quad (5)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}. \quad (6)$$

Звідси можемо зробити висновок, що на значення активної та реактивної потужності, які будуть виміряні відповідними приладами обліку, мають вплив три змінні параметри:

- напруга,
- струм,
- частота.

Аналіз існуючих відхилень напруги і частоти.

Відхилення напруги – відмінність фактичної напруги в сталому режимі роботи системи електропостачання від її номінального значення [1].

Відхилення напруги визначається різницею між її дійсним U і номінальним значеннями $U_{\text{ном}}$, В [2, 3]:

$$\delta U = U - U_{\text{ном}}. \quad (7)$$

Відхилення напруги в тій чи іншій точці мережі відбувається під впливом зміни навантаження у відповідності з її графіком.

В електричних мережах однофазного струму діюче значення напруги визначається як значення напруги основної частоти $U_{(1)}$ без урахування вищих гармонійних складових напруги, а в електромережах трифазного струму – як діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти $U_{1(1)}$ [4].

Нормально і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги на затискачах електроприймачів нормуються ГОСТ 13109-97 і дорівнюють, відповідно, $\delta U_{\text{нор}} = \pm 5\%$ і $\delta U_{\text{гран}} = \pm 10\%$.

Відхилення частоти напруги змінного струму, як встановлено у ГОСТ 13109 – 97, в електричних мережах характеризується показником відхилення частоти δf . Відхилення частоти від номінальної дорівнює різниці фактичного і номінального значення частоти.

У нормальних режимах допустимі значення відхилення частоти дорівнюють $\pm 0,2$ Гц і максимально допустимі $\pm 0,4$ Гц.

В післяаварійних режимах роботи електричної мережі допускається відхилення частоти від $\pm 0,5$ до -1 Гц загальною тривалістю за часом не більше 90 годин [5].

У відповідності до даних спостережень служби підстанції ПАТ «Сумиобленерго», які проводилися на КТП-134 на фідері № 34, від якого відбувається живлення побутових споживачів (одноповерхові житлові будинки) с. Яструбине, отримали результати вимірювання напруги (табл. 1) та частоти (табл. 2). Результати

наведені для фази А.

Вимірювання проводилися за допомогою аналізатора-реєстратора якості електроенергії з функцією вимірювання флікера REN-700 біля пункту живлення (КТП-134), на середині та в кінцевій точці фідера (останній будинок на лінії). Всього було виконано 2064 виміри для величини напруги та 972 виміри для частоти. Періодичність проведення вимірювань була виставлена такою, що дорівнювала інтервалу 30 хвилин.

За даними експериментів табл. 1 побудуємо залежність $p(U)$ рис. 1.

За даними експериментів табл. 2 побудуємо залежність $p(f)$ рис. 2.

Таблиця 1 – Результати спостережень випадкової величини напруги

№ з/п	Відсоткове відхилення, $\pm \%$	Відхилення у бік перевищення $U_{ном}$			Відхилення у бік, менший $U_{ном}$		
		Кількість результатів, n	$U/U_{ном}$	Випадкове значення U , В	Кількість результатів, n	$U/U_{ном}$	Випадкове значення U , В
1	0	81	1	220	81	1	220
2	0,5	81	1,005	221,1	80,5	0,995	218,9
3	1	80	1,01	222,2	79,5	0,99	217,8
4	1,5	79	1,015	223,3	78	0,985	216,7
5	2	77	1,02	224,4	77	0,98	215,6
6	2,5	76	1,025	225,5	76	0,975	214,5
7	3	75	1,03	226,6	75	0,97	213,4
8	3,5	72	1,035	227,7	72	0,965	212,3
9	4	70	1,04	228,8	70	0,96	211,2
10	4,5	67	1,045	229,9	66	0,955	210,1
11	5	59	1,05	231	59	0,95	209
12	5,5	46	1,055	232,1	47	0,945	207,9
13	6	36	1,06	233,2	38	0,94	206,8
14	6,5	31	1,065	234,3	32	0,935	205,7
15	7	24	1,07	235,4	25	0,93	204,6
16	7,5	19	1,075	236,5	19	0,925	203,5
17	8	12,5	1,08	237,6	12	0,92	202,4
18	8,5	9	1,085	238,7	8	0,915	201,3
19	9	6	1,09	239,8	6	0,91	200,2
20	9,5	5	1,095	240,9	5	0,905	199,1
21	10	5	1,1	242	5	0,9	198
22	10,5	4	1,105	243,1	4	0,895	196,9
23	11	3,5	1,11	244,2	3	0,89	195,8
24	11,5	3	1,115	245,3	3	0,885	194,7
25	12	3	1,12	246,4	3	0,88	193,6
26	12,5	3	1,125	247,5	3	0,875	192,5
27	13	1	1,13	248,6	1	0,87	191,4
28	13,5	1	1,135	249,7	1	0,865	190,3
29	14	1	1,14	250,8	1	0,86	189,2
30	14,5	1	1,145	251,9	1	0,855	188,1
31	15	1	1,15	253	1	0,85	187

На рис. 1 $p(U)$ – залежність, котра відображає вірогідність того, що при кількості експериментальних вимірювань n величина напруги дорівнюватиме значенню U ; $f(U)$ – теоретична крива нормального (Гаусівського) розподілу. Аналогічні міркування справедливі і для рис. 2, з тією різницею, що за змінну величину виступає частота f .

Порівнявши емпірично та теоретично отримані залежності за критерієм Пірсона, дійшли висновку, що згода між емпіричним і теоретичним нормальним розподілом є статистично значущою. Іншими словами, теоретично нормальний розподіл задовільно описує емпіричні дані.

Спираючись на вище викладене, вважаємо, що залежності $p(U)$ та $p(f)$ підкорюються нормальному (Гаусівському) закону розподілу. Тобто, маємо розподіл вірогідностей, які в одновірному випадку можуть бути задані функцією щільності вірогідності, що спадає з функцією Гауса [8, 11]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (8)$$

де m_x – параметр математичного сподівання; σ_x – середньоквадратичне відхилення; x_i – випадкове значення досліджуваної величини.

Таблиця 2 – Результати спостережень випадкової величини частоти

№ з/п	Відсоткове відхилення, $\pm \%$	Відхилення у бік перевищення $f_{ном}$			Відхилення у бік, менший $f_{ном}$		
		Кількість результатів, n	$ff_{ном}$	Випадкове значення f , Гц	Кількість результатів, n	$ff_{ном}$	Випадкове значення f , Гц
1	0	35	1	50	35	1	50
2	0,04	35	1,0004	50,02	34	0,9996	49,98
3	0,08	34	1,0008	50,04	34	0,9992	49,96
4	0,12	34	1,0012	50,06	34	0,9988	49,94
5	0,16	33	1,0016	50,08	33	0,9984	49,92
6	0,2	33	1,002	50,1	33	0,998	49,9
7	0,24	32	1,0024	50,12	33	0,9976	49,88
8	0,28	32	1,0028	50,14	32	0,9972	49,86
9	0,32	31	1,0032	50,16	31	0,9968	49,84
10	0,36	30	1,0036	50,18	30	0,9964	49,82
11	0,4	28	1,004	50,2	27	0,996	49,8
12	0,44	26	1,0044	50,22	26	0,9956	49,78
13	0,48	23	1,0048	50,24	22	0,9952	49,76
14	0,52	19	1,0052	50,26	19	0,9948	49,74
15	0,56	15	1,0056	50,28	15	0,9944	49,72
16	0,6	11	1,006	50,3	12	0,994	49,7
17	0,64	8	1,0064	50,32	9	0,9936	49,68
18	0,68	5	1,0068	50,34	5	0,9932	49,66
19	0,72	5	1,0072	50,36	4	0,9928	49,64
20	0,76	3	1,0076	50,38	3	0,9924	49,62
21	0,8	3	1,008	50,4	3	0,992	49,6
22	0,84	2	1,0084	50,42	3	0,9916	49,58
23	0,88	2	1,0088	50,44	2	0,9912	49,56
24	0,92	2	1,0092	50,46	2	0,9908	49,54
25	0,96	1	1,0096	50,48	1	0,9904	49,52
26	1	1	1,01	50,5	1	0,99	49,5
27	1,04	1	1,0104	50,52	1	0,9896	49,48
28	1,08	0,5	1,0108	50,54	0,5	0,9892	49,46
29	1,12	0,5	1,0112	50,56	0,5	0,9888	49,44
30	1,16	0,5	1,0116	50,58	0,5	0,9884	49,42
31	1,2	0,5	1,012	50,6	0,5	0,988	49,4

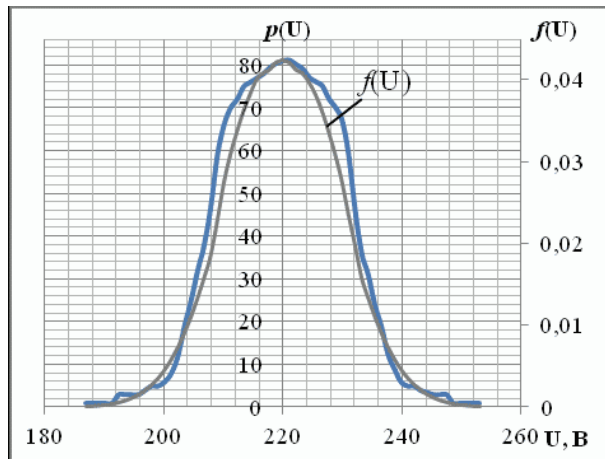


Рисунок 1 – Нормальний закон розподілу для величини напруги

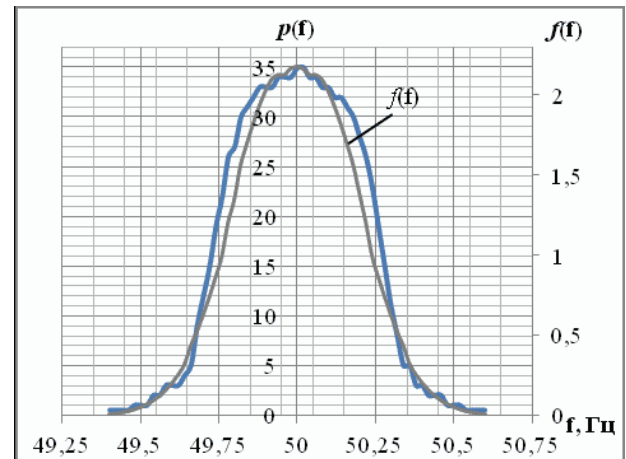


Рисунок 2 – Нормальний закон розподілу для величини частоти

Далі приймемо, що таке ж розподілення напруги та частоти має місце у звичайній однофазній електричній мережі і з'ясуємо, який вплив матимуть відхилення напруги та частоти від номінальних значень (220 В та 50 Гц) на покази індуктивних лічильників активної та реактивної енергії. Під «звичайною» тут розуміємо електричну мережу, приведену до вигляду еквівалентного електричного кола, в якому є навантаження активного, індуктивного та ємнісного характе-

ру (рис. 3).

У якості приймачів електричного кола візьмемо трифазний асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором 5AMX132S6 та конденсатор Last One ємністю 1000 мкФ, розрахований на номінальну напругу 330 В [6].

Шість полюсів статора АД 5AMX132S6 з'єднуємо послідовно. Їхній активний загальний опір дорівнює 21,0027 Ом, а реактивний індуктивний –

17,4032 Ом (визначено шляхом перерахунку коефіцієнта потужності електричного кола рис. 3, виміряного за допомогою вимірювальних кліщів, та загального опору, визначеного мультиметром).

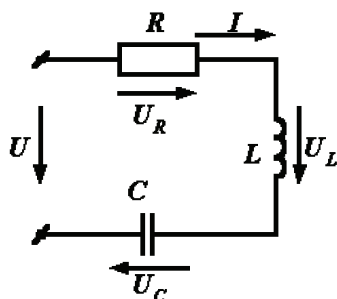


Рисунок 3 – Послідовне електричне коло змінного струму

Отже маємо коло з такими параметрами:

- номінальна напруга: $U = 220$ В;
- активний опір: $R = 21,0027$ Ом;
- індуктивність: $L = 0,05542$ Гн;
- ємність: $C = 0,001$ Ф.

Так як величини напруги та частоти підкорюються Гаусівському закону розподілу, то можемо обробити отримані результати експериментів, використовуючи такі числові характеристики випадкових величин та їхніх систем:

1. Математичне сподівання (середня ймовірність значення випадкової величини):

$$M[x] = m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx. \quad (9)$$

Математична оцінка сподівання:

$$M^*[X] = m_x^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (10)$$

де n – кількість експериментів.

2. Дисперсія випадкової величини (міра розкиду даної випадкової величини, тобто її відхилення від математичного очікування):

$$D[x] = D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx, \quad (11)$$

Математична оцінка дисперсії:

$$D^*[X] = D_x^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2. \quad (12)$$

$$D^*[X] = D_x^* = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n} \right]. \quad (13)$$

3. Середньоквадратичне відхилення (показник розсіювання значень випадкової величини відносно її математичного очікування):

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (14)$$

Математична оцінка середньоквадратичного відхилення:

$$\sigma_x^* = \sqrt{D_x^*}. \quad (15)$$

Напруга і частота в електричній мережі носять випадковий характер. За даними експериментів (табл. 1 та 2) можемо визначити для них математичне сподівання, користуючись формулами (9) та (10). Отримаємо:

$m_U = 219,98$ В, $m_f = 49,9998$ Гц.

Для визначення показів індуктивних лічильників активної та реактивної енергії при різних коливаннях напруги та частоти в електричній мережі (рис. 3), реалізуємо програмний код, написаний мовою С у середовищі Borland C++ 3.1. Ця програма буде відтворювати алгоритм роботи лічильників активної та реактивної енергії, що описаний у формулах (1) і (2).

Послідовність моделювання відхилення напруги від номінального значення в середовищі Borland C++ 3.1.

1. Розглядаємо випадки, коли величина напруги може мати відхилення від номінального значення в таких межах: $\pm 2,5\%$; $\pm 5\%$; $\pm 7,5\%$; $\pm 10\%$; $\pm 12,5\%$; та $\pm 15\%$. При цьому частоту вважаємо незмінною та такою, що дорівнює 49,9998 Гц.

2. Використовуючи формули (11) – (15), визначимо значення дисперсії та середньоквадратичного відхилення для напруги.

3. Математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення напруги та параметри електричної мережі заносяться до програми.

4. Для частоти приймаємо математичне сподівання $m_f = 49,9998$ Гц та середньоквадратичне відхилення $\sigma_f = 0$. Заносимо ці данні до програми.

5. Опір елементів електричної мережі (рис. 3) вважаємо таким, що не залежить від напруги і залежить від частоти (відповідно до формул (5) та (6) для реактивної складової опору). Діюче значення струму може бути визначене за законом Ома наступним чином:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (16)$$

6. Кількість розрахункових ітерацій пошуку випадкової величини: $1 \cdot 10^6$. Отримані результати представимо їх у табл. 3.

В табл. 3 використано наступні позначення:

$U_{ном}$, % – відхилення напруги від номінального значення, %;

D_U – дисперсія напруги, В²;

σ_U – середньоквадратичне відхилення величини напруги, В;

m_P – математичне сподівання активної потужності, Вт;

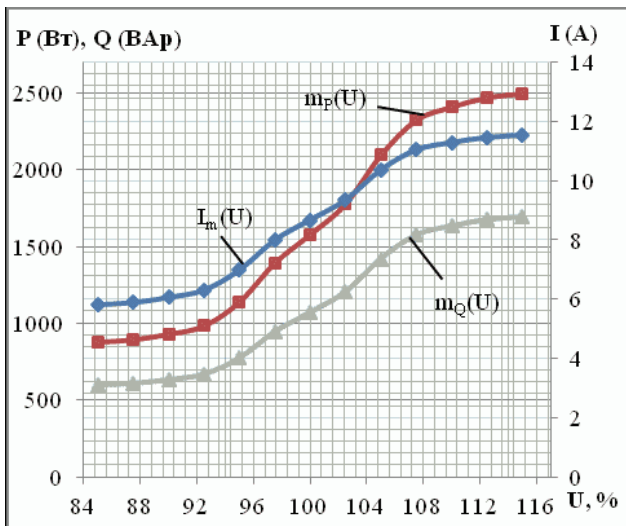
σ_P – середньоквадратичне відхилення активної потужності, Вт;

m_Q – математичне сподівання реактивної потужності, ВАр;

σ_Q – середньоквадратичне відхилення реактивної потужності, ВАр.

За табл. 3 побудуємо відповідні графіки залежностей на рис. 4.

Побудовані графіки залежностей наочно демонструють, що відхилення напруги має значний вплив на значення активної та реактивної потужності та струму. Зростання величини напруги в електричній мережі призводить до збільшення активної та реактивної потужності та струму, а зменшення напруги – до зменшення названих величин.

Рисунок 4 – Графіки залежностей $m_P(U)$, $m_Q(U)$, $I_m(U)$

Відповідно до формул (1) і (2), за умови $t = \text{const}$, це матиме вплив на покази лічильників активної та реактивної енергії.

Послідовність програмного моделювання відхилення частоти від номінального значення в Borland C++ 3.1.

1. Розглядаємо випадки, коли величина частоти може мати відхилення від номінального значення в таких межах: $\pm 0,2\%$; $\pm 0,4\%$; $\pm 0,6\%$; $\pm 0,8\%$; $\pm 1\%$; та $\pm 1,2\%$. При цьому напругу вважаємо незмінною та такою, що дорівнює 219,98 В

2. За допомогою формул (11) – (15), визначаються значення дисперсії та середньоквадратичного відхилення для частоти.

3. Математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення частоти та параметри електричної мережі заносяться до програми.

4. Для напруги приймаємо математичне сподівання $m_U = 219,98$ Гц та середньоквадратичне відхилення $\sigma_U = 0$. Заносимо ці данні до програми.

5. Все інше – як і для випадку з напругою. Кількість розрахункових ітерацій для пошуку випадкової величини: $1 \cdot 10^6$. Отримані результати показані у табл. 4.

В табл. 4 використано наступні позначення:

$f_{\text{ном}}$, % – відхилення напруги від номінального значення, %;

D_f – дисперсія напруги, Гц²;

σ_f – середньоквадратичне відхилення величини частоти, Гц;

m_P – математичне сподівання активної потужності, Вт;

Таблиця 3 – Результати програмного моделювання при відхиленні напруги

Результати розрахунків			Результати програмного моделювання									
$U_{\text{ном}}$, %	D_U , В ²	σ_U , В	$\cos\phi$	$\sin\phi$	I, А	X_L , Ом	X_C , Ом	m_P , Вт	σ_P , Вт	m_Q , ВАр	σ_Q , ВАр	
85	88,43176	9,4038	0,827919	0,560847	5,81233	17,4107	3,1831	879,413	141,853	595,73	96,094	
87,5	83,82168	9,1554	0,827919	0,560847	5,88788	17,4107	3,1831	895,092	139,344	606,352	95,3944	
90	73,81909	8,5918	0,827919	0,560847	6,05928	17,4107	3,1831	931,235	133,404	630,835	90,3704	
92,5	60,51496	7,7791	0,827919	0,560847	6,30645	17,4107	3,1831	984,736	124,233	667,078	84,1578	
95	30,7723	5,5473	0,827919	0,560847	6,98521	17,4107	3,1831	1140,07	95,3574	772,305	64,5968	
97,5	4,971675	2,2297	0,827919	0,560847	7,9942	17,4107	3,1831	1393,77	42,3842	944,168	28,7118	
100	0	0,0000	0,827919	0,560847	8,67232	17,4107	3,1831	1579,6	0,000688	1070,05	0,000594	
102,5	4,971675	2,2297	0,827919	0,560847	9,35045	17,4107	3,1831	1777,73	47,8545	1204,27	32,4175	
105	30,7723	5,5473	0,827919	0,560847	10,3594	17,4107	3,1831	2095,32	129,208	1419,41	87,5277	
107,5	60,51496	7,7791	0,827919	0,560847	11,0382	17,4107	3,1831	2324,3	190,779	1574,52	129,237	
110	73,81909	8,5918	0,827919	0,560847	11,2854	17,4107	3,1831	2410,75	214,569	1633,08	145,353	
112,5	83,82168	9,1554	0,827919	0,560847	11,4568	17,4107	3,1831	2471,66	231,496	1674,34	156,82	
115	88,43176	9,4038	0,827919	0,560847	11,5323	17,4107	3,1831	2498,75	239,069	1692,7	161,949	

Таблиця 4 – Результати програмного моделювання при відхиленні частоти

Результати розрахунків			Результати програмного моделювання									
$f_{\text{ном}}$, %	D_f , Гц ²	σ_f , Гц	$\cos\phi$	$\sin\phi$	I, А	X_L , Ом	X_C , Ом	m_P , Вт	σ_P , Вт	m_Q , ВАр	σ_Q , ВАр	
98,8	0,033656437	0,18346	0,827673	0,561211	8,66975	17,4221	3,18102	1579,58	5,29893	1070,04	2,11628	
99	0,031759011	0,17821	0,82768	0,5612	8,66982	17,4218	3,18108	1579,59	5,1473	1070,04	2,05571	
99,2	0,028191967	0,16790	0,827694	0,56118	8,66996	17,4211	3,1812	1579,59	4,849952	1074,04	1,93677	
99,4	0,022126468	0,14875	0,82772	0,561142	8,67023	17,4199	3,18141	1579,59	4,29643	1070,04	1,71587	
99,6	0,009665499	0,09831	0,827787	0,561042	8,67094	17,4168	3,18199	1579,59	2,83958	1070,05	1,13403	
99,8	0,001507312	0,03882	0,827867	0,560924	8,67178	17,4131	3,18266	1579,59	1,12129	1070,05	0,447814	
100	0,00000	0,0000	0,827919	0,560847	8,67232	17,4107	3,1831	1579,6	0,000688	1070,05	0,000594	
100,2	0,001507312	0,03882	0,827971	0,56077	8,67287	17,4083	3,18354	1579,6	1,1213	1070,04	0,447855	
100,4	0,009665499	0,09831	0,828051	0,560653	8,67371	17,4046	3,18421	1579,61	2,83967	1070,04	1,13429	
100,6	0,022126468	0,14875	0,828119	0,560553	8,67442	17,4015	3,18479	1579,61	4,29665	1070,03	1,71646	
100,8	0,028191967	0,16790	0,828145	0,560515	8,67468	17,4003	3,185	1579,62	4,82981	1070,03	1,93754	
101	0,031759011	0,17821	0,828158	0,560494	8,67483	17,3997	3,18512	1579,62	5,14762	1070,02	2,05657	
101,2	0,033656437	0,18346	0,828165	0,560484	8,6749	17,3993	3,18518	1579,62	5,29927	1070,02	2,11719	

σ_p – середньоквадратичне відхилення активної потужності, Вт;

m_Q – математичне сподівання реактивної потужності, ВАр;

σ_Q – середньоквадратичне відхилення реактивної потужності, ВАр.

За табл. 4 побудуємо відповідні графіки залежностей на рис. 5 та 6.

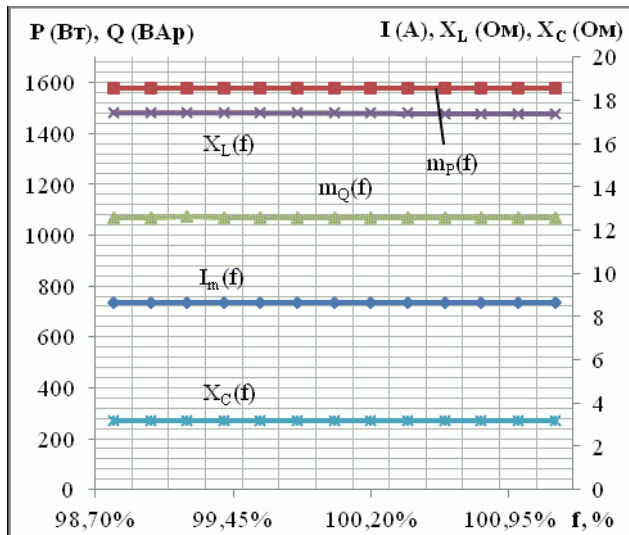


Рисунок 5 – Графіки залежностей $m_p(f)$, $m_Q(f)$, $I_m(f)$, $X_L(f)$, $X_C(f)$

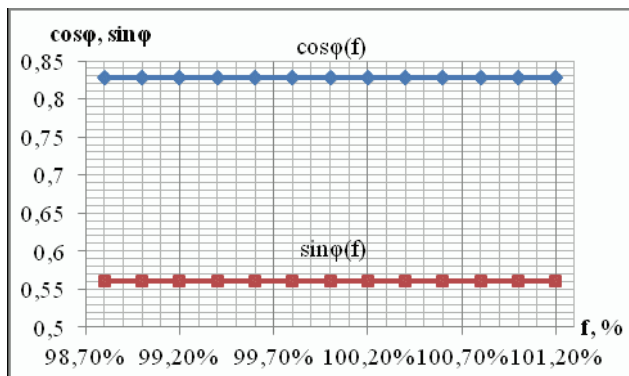


Рисунок 6 – Графіки залежностей $\cos \varphi(U)$, $\sin \varphi(U)$

З побудованих залежностей видно, що відхилення частоти в означених вище межах майже не впливає на значення активної та реактивної потужності та інші параметри електричного кола. Зростання/зменшення величини частоти в електричній мережі майже не призводить до змін активної та реактивної потужності.

Відповідно до формул (1) і (2) та враховуючи формули (3) – (6), за умови $t = \text{const}$, коливання частоти в розглянутих межах майже не змінить покази лічильників активної та реактивної енергії.

Висновки. Розглянуто розподілення напруги і частоти, які мають місце в електричних мережах. За даними вимірювань побудовано графіки залежностей $p(U)$ та $p(f)$. Використовуючи аналіз за критерієм Пірсона, показано, що з отриманих графіків видно, що напруга і частота є випадковими величинами, які змі-

нюються у певному діапазоні і підкорюються Гаусівському закону розподілу.

Використовуючи числові характеристики випадкових величин (математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення) було проаналізовано вплив відхилень напруги (в межах $\pm 15\%$) та частоти (в межах $\pm 1,2\%$) на покази індукційних лічильників активної та реактивної електроенергії, за умови, що $t = \text{const}$ (розглядається певний фіксований проміжок часу).

Аналіз було здійснено за допомогою програми, написаної на програмній мові C в середовищі Borland C++ 3.1. В якості електричної мережі розглянуто електричне навантаження, яке має активно-реактивний характер (реактивна складова має індуктивно-емнісний характер).

Використовуючи програмне моделювання в середовищі Borland C++ 3.1, з'ясували, що зміни величини електричної напруги можуть призводити до значних змін споживання електричної енергії, а, відповідно, і до змін показів індуктивних лічильників електроенергії (до $-44,33\%$ у випадку відхилення у бік -15% та до $+58,19\%$ у випадку відхилення у бік $+15\%$).

Зміни величини частоти майже не впливають на результати показів індуктивних лічильників електроенергії (до $0,0013\%$ у випадках відхилення у на рівні $\pm 1,2\%$).

Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок, що регулювання напруги на ввіді електроприймача є доцільним. Це дозволить не лише запобігти пошкодженню електрообладнання та зменшенню його терміну служби (наприклад, АД, які чутливі до змін напруги), але і запобігти змінам показів приладів обліку електроенергії.

Список літератури: 1. Ланцов А. Показатели качества электрической энергии: отклонение напряжения // E-Audit. n. d. – Режим доступа : <http://www.e-audit.ru/quality/deviation.shtml>. – Дата звертання : 10 жовтня 2015. 2. Шевченко С. Ю. Актуальність урахування впливу показників якості напруги при обліку електричної енергії / С. Ю. Шевченко, В. В. Волохін, І. М. Дяговченко, Д. М. Макуха // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 156–157. 3. Селивахин А. И. Эксплуатация электрических распределительных сетей / А. И. Селивахин, Р. Ш. Сагутдинов. – М.: Высшая школа, 1990. – 238 с. 4. ГОСТ13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». 5. Ананичева С. С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие / С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин. – 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 93 с. 6. Конденсатор Last One // Корпорация «Тетра»: электронный каталог продукции. 2014. – Режим доступа : http://tetraCorp.com.ua/kondensatori/puskovie/p_lastone/last1000mF330v. – Дата звертання: 15 жовтня 2015. 7. Барбаро П. В. Характеристики счетчиков реактивной энергии в системах электроснабжения с искажениями / П. В. Барбаро, А. Каталиотти, В. Козентино, С. Нуксио // Труды XVIII Всемир. Конгресса ИМЕКО «Метрология для стабильного развития». – Рио-де-Жанейро, 17-22 вересня 2006. 8. Victor D. Kernel Density Estimation of the Unknown Probability Density Function / D. Victor // MQL5, 4 червня 2012. – Режим доступа: <https://www.mql5.com/en/articles/396>. – Дата звертання : 18 жовтня 2015. 9. Shakirov Sh. R. Nonperturbative Approach to Finite-Dimensional Non-Gaussian Integrals / Sh. R. Shakirov // Springer New York. Theoretical and Mathematical Physics. – 2010. – № 163. – С. 804–812. 10. Sung Y. Park Maximum Entropy Autoregressive Conditional Heteroskedasticity Model / Y. Park, Sun, Anil K. Bera // El-sevier B. V. Journal of Econometrics. – 2009. – № 150. – С. 219–222.

Bibliography (transliterated): 1. Lantsov A. Pokazately kachestva elektrycheskoy enerhyy: otklonenye napryazhenyya. E-Audit, n. d. Web. 10 October 2015 <<http://www.e-audit.ru/quality/deviation.shtml>>. 2. Shevchenko S. Yu., V. V. Volokhin, I. M. Dyahovchenko and D. M. Makukha "Aktualnist urakhuvannya vplyvu pokaznykiv yakosti napruhy pry obliku elektrychnoyi enerhyi." Vestn. Har'k. politehn. in-ta. Ser.: Tekhn. Ta elektrofizyka vysokyykh napruh. No. 20. 2015. 156–157. Print. 3. Selyvakhyn A. Y. and R. Sh. Sahutdynov Ekspluatatsyya elektrycheskykh raspredelytelnykh setey. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. Print. 4. HOST 13109-97 "Normy kachestva jelektricheskoy jenerghii v sistemah jelektrosnabzheniya obshhego naznachenija". 5. Ananycheva S. S., A. A. Alekseev and A. L. Myzyn Kachestvo elektroenerhyy. Rehulyrovanye napryazhenyya y chastote v enerhosystemakh. Ekaterynburh:UrFU, 2012. Print. 6. Kondensator Last Web. 15 October 2015

<http://tetracorp.com.ua/kondensatori/puskovie/p_lastone/last1000mF330v>. 7. Barbaro P. V., A. Katalyotty, V. Kozentyno and S. Nuksyo "Kharakterystyky schetchykov reaktyvnoy enerhyy v systemakh e-lektrosnabzhenyya s yskazhenyyamy" XVIII World Conderence IMEKO "Metrolohyya dlya stablynoho razvytyya". Ryo-de-Zhaneyro, 17-22 September 2006. 8. Victor D. Kernel Density Estimation of the Unknown Probability Density Function. MQL5, 4 June 2012. Web. 18 October 2015. <<https://www.mql5.com/en/articles/396>>. 9. Shakirov Sh. R. "Nonpreturbative Approach to Finite-Dimensional Non-Gaussian Integrals." Springer New York. Theoretical and Mathematical Physics. No. 163. 2010. 804–812. Print. 10. Sung Y. Park and Anil K. Bera "Maximum Entropy Autoregressive Conductional Heteroskedasticity Model." Elsevier B. V. Journal of Econometrics. No 150. 2009. 219–222. Print.

Надійшла (received) 26.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шевченко Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «ХПІ», професор кафедри передачі електричної енергії; тел.: (050) 291-44-51; e-mail: syurik42@rambler.ru.

Shevchenko Serhiy Yuriyovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "KPI", Full Professor at the Department of transmission of electric energy; tel.: (050) 291-44-51; e-mail: syurik42@rambler.ru.

Волохін Віталій Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри електроенергетики; тел.: (095) 104-08-90; e-mail: vetvol-13@rambler.ru.

Volokhin Vitaliy Vasylovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Sumy State University, Associate Professor at the Department of Electroenergetics; tel.: (095) 104-08-90; e-mail: vetvol-13@rambler.ru.

Лебедка Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, старший викладач кафедри електроенергетики; тел.: (066) 842-20-33; e-mail: lebedka_serg@ukr.net.

Lebedka Serhiy Mykolayovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Sumy State University, Senior Lecturer at the Department of Electroenergetics; tel.: (066) 842-20-33; e-mail: lebedka_serg@ukr.net.

Дяговченко Ілля Миколайович – Сумський державний університет, аспірант кафедри електроенергетики; тел.: (095) 728-04-78; e-mail: diahovchenko5@inbox.ru.

Diahovchenko Illia Mykolayovych – Sumy State University, postgraduate at the Department of Electroenergetics; tel.: (095) 728-04-78; e-mail: diahovchenko5@inbox.ru.

Качан Максим Віталійович – Сумський державний університет, аспірант кафедри електроенергетики; тел.: (099) 906-03-25; e-mail: adamant-fff@yandex.ru.

Kachan Maksym Vitaliyovych – Sumy State University, postgraduate at the Department of Electroenergetics; tel.: (099) 906-03-25; e-mail: adamant-fff@yandex.ru.

РЕФЕРАТИ

УДК 537.529:544.344.015.4.

Математична модель процесу електровибуху циліндричних провідників / В. Ю. Баклар, Д. И. Челпанов, Н. И. Кускова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 3-7. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Розроблена математична модель електровибуху циліндричних провідників, яка заснована на уявленні о хвилі випаровування. Одержані аналітичні вирази для часових залежностей опору, струму, напруги та тиску від параметрів електроустановки і характерних розмірів провідника в процесі однорідного нагріву циліндричних провідників імпульсним струмом. Експериментально одержані часові залежності опору, струму та напруги. Проведене порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Ключові слова: математична модель, електричний вибух провідників, погоджений режим електровибуху, хвиля випаровування.

УДК 621.3.022:537.311.8

Застосування потужного високовольтного генератора ГІТМ-10/350 для оцінки електротермічною блискавкостійкості проводів і кабелів електричних ланцюгів об'єктів промислової електроенергетики / М.И. Баранов, С.В. Рудаков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 7-12. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведені результати дослідженої оцінки стійкості зразків ряду дротів і кабелів з мідними (алюмінієвими) жилами, поліетиленовою (ПЕТ) і полівінілхлоридною (ПВХ) ізоляцією електричних кіл об'єктів промислової електроенергетики до дії аперіодичного імпульсу струму 10/350 мкс штучної блискавки з нормованими по вимогах міжнародних і національних стандартів амплітудно-часовими параметрами (АЧП) і допусками на них. Визначені максимальні чисельні значення гранично допустимих і критичних щільностей вказаного імпульсу струму штучної блискавки з нормованими АЧП і допусками на них в даних дротах (кабелях) силових електричних кіл енергооб'єктів з ПЕТ і ПВХ ізоляцією.

Ключові слова: потужний високовольтний генератор струму штучної блискавки; дроти і кабелі електричних кіл об'єктів електроенергетики; блискавкостійкість кабельно-провідникової продукції енергооб'єктів; гранично допустима і критична щільність імпульсу струму 10/350 мкс штучної блискавки в дротах і кабелях енергооб'єктів.

УДК 519.2

Вимоги до пристроїв блокування оперативних перемикачів при розробці і виготовленні нової продукції / Р. К. Борисов, Д. И. Ковалев, Г. М. Колишко, О. С. Недзельский, Е. Г. Понуждаева // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 12-16. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто вимоги до пристроїв оперативних перемикачів при комутаційних апаратів високої напруги, що застосовуються на енергооб'єктах. Описано науково-дослідницькі та проектно-конструкторські роботи зі створення блокуючого пристрою нового комплексу електрообладнання для підвищення надійності та електробезпечності персоналу приведенні оперативних перемикачів у розподільних пристроях напругою 6 – 750 кВ електричних станцій і підстанцій. Подано схему електричну, та описано конструкцію дослідного зразка пристрою, що пройшов приймальні випробування у складі комплексу електрообладнання.

Ключові слова: пристрій блокування, оперативні перемикачів, комутаційні апарати, електробезпечність, висока напруга, розподільні пристрої, електричні станції.

УДК 621.317

Діагностика заземлюючих пристроїв і систем блискавкозахисту об'єктів електроенергетики на сучасному етапі / О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Д. Г. Колишко, Г. М. Колишко, А. В. Пличко, О. Л. Резинкин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 17-24. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

На підставі призначення та складу заземлювального пристрою та системи блискавкозахисту показано основне правило забезпечення електробезпеки. Перераховані недоліки заземлювальних пристроїв, систем блискавкозахисту та кабельних споруд. Сформульовано основне правило забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів, які використовуються на електроенергетичних об'єктах. Наведено перелік випробувань технічних засобів на стійкість до нормованих електромагнітних впливів. Сформульований склад робіт з діагностики заземлювального пристрою та системи блискавкозахисту, з визначення показників електромагнітного стану діючих об'єктах. Наведені основні рекомендації щодо ремонту заземлювальних пристроїв та забезпеченню електромагнітної сумісності.

Ключові слова: електробезпека, заземлювальний пристрій, напруга дотику, система блискавкозахисту, випробування на стійкість, електромагнітна сумісність, електромагнітне середовище.

УДК 621.317

Терміни і визначення з блискавкозахисту ДСТУ EN 62305-X:2012 / О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Д. Г. Колишко, Г. М. Колишко, М. М. Резинкина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 24-40. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0740.

Представлено переклад з англійської на українську та російську мови термінів та визначень міжнародних стандартів ІЕС 62305-X:2010 з блискавкозахисту. Загальна кількість термінів складає 112 шт. Вказано розбіжність термінів та визначень у різних частинах міжнародного стандарту. Запропоновано зацікавленим фахівцям та організаціям прийняти участь у обговоренні, виправленні та доповненні запропонованих формулювань. Вказано, що діючі в Україні стандарти з блискавкозахисту значно відрізняються один від одного по формі та змісту. Запропоновано відмінити стандарт України ДСТУ Б В.2.5-38:2008.

Ключові слова: стандарти з блискавкозахисту, система блискавкозахисту зовнішня та внутрішня, блискавкоприймач, струмовідвід, заземлювач, пристрій захисту від сплесків.

УДК 621.317.318

Порівняльний аналіз методів розрахункової оцінки кількості ударів блискавки в об'єкт / В. В. Князєв, В. М. Дронов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 41-44. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Представлено результати розрахункової оцінки кількості очікуваних розрядів блискавки в конструкцію типу ангара, які отримано двома методами: з використанням прикладної програми «Ймовірність», розробленої авторами, і формул «3Н» з діючих стандартів. У програмі реалізований електрогеометричний метод (EGM), який є базовим при оцінці зон захисту блискавкоприймачів. Розрахунки проведено з урахуванням статистичного розподілу амплітуд струмів блискавки відповідно до параметрів заданими в стандарті ІЕС 62305-1: 2010. Розглянуто діапазон сили струму блискавки (2 - 200) кА, що відповідає І рівню блискавкозахисту. Ймовірність того, що сила струму блискавки перевищить значення 200 кА не більше 1%. Формули «3Н», застосовувані для оцінки «площі стягання» дають завищений в кілька разів (для

розглянутого об'єкта в 2,67 рази) результат, оскільки не враховують реальну форму об'єкта і статистичний розподіл сили струму блискавки, визначального радіус сфери, що котиться, в EGM методі

Ключові слова: блискавка, сила струму, статистичний розподіл ймовірності, електрогеометричеський метод, число ударів блискавки, прикладне програмне забезпечення.

УДК 621.318

Аналіз впливу зовнішніх електромагнітних полів на працездатність напівпровідникових приладів / В.І. Кравченко, О.А. Серков, В.С. Бреславець, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 45-49. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено аналіз впливу зовнішніх електромагнітних полів на працездатність напівпровідникових приладів. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Запропоновано механізм появи поверхневих електронних станів на нерівних межах провідних твердих середовищ. Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики перехідного та черенківського випромінювання. Побудовано теорію безіткнувального згасання поверхневих поляритонів у квантовому та класичному наближеннях.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, безіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.318

Вплив нерівностей поверхні твердих тіл на спектр електронів і плазмових коливань / В.І. Кравченко, О.А. Серков, В.С. Бреславець, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 49-51. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Визначено механізм виникнення поверхневих електронних станів на періодично нерівній межі розділу провідних твердих тіл. Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання. Показано, що вплив імпульсного електромагнітного випромінювання супроводжується виникненням струмів в провідних елементах виробів і виникненням їх внутрішніх полів. магнітного випромінювання. Розроблено новий механізм появи поверхневих електронних станів на нерівній поверхні провідних твердих тіл. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхонь провідних твердих тіл у випромінюючих структурах на спектральні характеристики перехідного і черенківського випромінювання. Розроблено теорію безіткнувального згасання поверхневих поляритонів в квантовому і класичному наближеннях.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, безіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.318

Фізичні моделі зворотних відмов напівпровідникових приладів в умовах електромагнітної дії / В.І. Кравченко, О.А. Серков, В.С. Бреславець, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 52-55. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Запропоновано фізичні моделі зворотних відмов напівпровідникових приладів в умовах дії електромагнітного впливу. Розроблено новий механізм появи поверхневих електронних станів на нерівних межах провідних твердих середовищ. Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики перехідного та черенковського випромінювання. Побудовано теорію безіткнувального згасання поверхневих поляритонів у квантовому та класичному наближеннях.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, безіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.318

Моделювання фізичних механізмів виникнення незворотних відмов напівпровідникових приладів в умовах електромагнітної дії / В.І. Кравченко, О.А. Серков, В.С. Бреславець, І.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 56-59. – Бібліогр.: 99 назв. – ISSN 2079-0740.

Досліджено існуючі фізичні моделі механізмів впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання на працездатність напівпровідникових приладів в галузі незворотних відмов. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Запропоновано механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики перехідного та черенковського випромінювання.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, безіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 544.323.2:544.56.1:621.762

Термодинамічний аналіз гетерогенних хімічних реакцій в системі «суміш порошків Fe – Ti – вуглеводнева рідина» під впливом високовольтних електричних розрядів / Є. В. Липян, О. М. Сизоненко, А. С. Торпаков, О. О. Жданов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 59-65. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведено термодинамічний аналіз хімічної рівноваги для суміші порошків заліза і титану в середовищі вуглеводневої рідини під впливом високовольтних електричних розрядів. Теоретично обґрунтовано можливість одержання карбідів і інтерметалідів з вихідної суміші та визначено необхідні для цього рівні температури і тиску. Отримані теоретичні результати підтверджені експериментально синтезом TiC , Fe_3C і Fe_2Ti .

Ключові слова: термодинаміка, енергія Гіббса, парціальний тиск, високовольтний електричний розряд, вуглеводнева рідина, синтез, карбіди металів, інтерметаліди, порошки, рентгенофазовий аналіз, гетерогенні реакції, дисперсна система.

УДК 621.315.615:621.319.4

Вивчення стабільності електрофізичних властивостей поліметилсилоксанової рідини при її контактуванні з плівковими елементами діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів під дією підвищених температур / А.П.Малюшевська, С.О.Топоров // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 66-69. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Вивчено зміну електрофізичних властивостей ПМС рідини як такої, що може використовуватися для просочення плівкових діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів. Визначено низьку ступінь термостимульованої взаємодії поліметилсилоксанової рідини з поліпропіленовою та поліетилтерефталатними плівками. На прикладі рідини ПМС–20 показано високу термостабільність електрофізичних властивостей органосилоксанових рідин, за винятком високої чутливості її короточасної електричної міцності до виникнення електророзрядних явищ.

Ключові слова: просочений плівковий діелектрик, органосилоксанові рідини, короточасна електрична міцність.

УДК 621.317.3

Генератор для випробувань БАО на сприйнятливість до перехідних процесів, викликаних блискавкою (« удари» форми 5А) ІГЛА-МКУ-5А / Ю.С.Немченко, В.В.Князев, І.П.Лесной, С.Б.Сомхів // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 70-73. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Описано конструкція та результати атестації генератора, призначеного для випробувань бортового авіаційного обладнання на сприйнятливість до перехідних процесів, викликаних блискавкою «багатократні удари» форми 5А, відповідно до вимог міжнародних стандартів. Генератор виробляє циклограми імпульсів струму форми 5А за 5-ма рівнями випробувань. Кожна циклограма складається з випробувальних пакетів імпульсів від 1 до 999, а в кожному випробувальному пакеті – 14 випробувальних імпульсів.

Ключові слова: випробування, бортове устаткування, несприйнятливість, блискавка, перехідні процеси, генератор, атестація.

УДК 004.056

Методи забезпечення цілісності інформації в інфокомунікаційних системах / В.Я.Певнев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 74-77. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Обґрунтовано проблема цілісності інформації як найбільш уразливого ланки у забезпеченні інформаційної безпеки. Розглянуто загрози цілісності на різних етапах життєвого циклу інформації. Представлені основні методи забезпечення цілісності інформації. У кожному з розглянутих методів виділені основні загрози та шляхи їх вирішення. Комплексне використання розглянутих організаційних, технічних, програмних рішень дозволяє забезпечити цілісність інформації як основоположної складової інформаційної безпеки систем.

Ключові слова: цілісність інформації, загрози, життєвий цикл, методи забезпечення, інформаційна безпека.

УДК 551.594

Моделювання ураження площини розрядом довгої іскри з використанням багатокрокової моделі / О. О. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 78-82. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Показано, що запропонована модель для діапазону зміни висот орієнтування від 0,78 м до 5 м адекватно описує розподіл точок ураження площини довгою іскрою. Близькі значення варіативних параметрів моделі дозволяють запропонувати модель для прогнозування розподілу точок ураження площини при більших значеннях висоти орієнтування для геометрично подібних розрядних проміжків. Матеріали роботи можуть бути використані для побудови моделей поразки довгою іскрою об'єктів, розташованих на плоскій поверхні.

Ключові слова: математична модель, функція розподілу, випадкова величина, розряд довгої іскри.

УДК 621.317.08

Моделювання електромагнітної обстановки у приміщенні апаратної кіноконцертного комплексу / В.В. Піліський, О.С. Чупахін, Р.О. Сирота // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 83-86. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0740.

Виконано визначення рівнів електромагнітних полів у приміщенні апаратної. Проаналізовано обладнання апаратної кіноконцертного комплексу, як джерел, рецепторів неавтоматизованих електромагнітних завод. Запропоновано алгоритм опису електромагнітної обстановки у приміщенні кіноконцертного комплексу, обладнаного функціональною апаратурою різного призначення. Реалізована прикладна програма, де використана методика ітеративного моделювання. Наведено результати моделювання електромагнітних полів всередині приміщення апаратної кіноконцертного комплексу.

Ключові слова: електромагнітна обстановка, електромагнітна сумісність, кіноконцертний комплекс, джерело завод, рецептор завод, норми емісії, чутливість, прогнозування, моделювання.

УДК 621.317.318

Порівняльний аналіз засобів вимірювання електростатичного поля в атмосфері в передгрозовій обстановці / І. О. Постільник, С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 87-91. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведено порівняльний аналіз засобів вимірювання напруженості електростатичного поля в атмосфері Землі в передгрозовій обстановці. Розглянуто фізичні основи методу вимірювання електростатичного поля за допомогою електричної індукції. Вказані основні переваги і недоліки засобів вимірювання, що використовують метод електричної індукції. Міститься опис технології мікромеханічних засобів вимірювання напруженості електростатичного поля. Показана можливість локального моніторингу передгрозовою обстановки, для визначення ймовірності виникнення молнієвого розряду за рахунок вимірювання електростатичного поля, що виникає між зарядженим хмарою і поверхнею землі.

Ключові слова: електростатичне поле, роторний вольтметр, вібраційний вольтметр, МЕМС технологія, блискавка, заряди, електрична індукція.

УДК 621.317.39.084.2

Дослідження метрологічних характеристик вимірювальних перетворювачів у вигляді ступеневої коаксіального неоднорідного резонатора для дількометрії рідких середовищ в НВЧ діапазоні / В.В. Рудаков, А.А. Коробко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 91-95. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено дослідження електромагнітних процесів в ступінчастому неоднорідному коаксіальному резонаторі. Дослідження проведені для випадку ідеальних ліній, по яких поширюється виключно електромагнітні хвилі Т - типу. Отримано узагальнене вираження для спектра резонансних частот, яке дозволяє визначити частоти резонансу при будь-яких поєднаннях геометричних параметрів і електричних характеристик елементів резонатора. Удосконалено конструкції резонатора з метою отримання мінімального значення першого резонансної частоти при його мінімальних розмірах. Отримано точний вираз для першої резонансної частоти досліджуваного резонатора. Показано повний збіг

результатів досліджень з отриманими раніше результатами імітаційного моделювання. Визначена метрологічна характеристика резонатора - залежність частоти першого резонансу від діелектричної проникності досліджуваної рідини, що дозволяє застосовувати його для дількометрії рідких середовищ в НВЧ діапазоні.

Ключові слова: ступінчастий неоднорідний резонатор, електромагнітні хвилі Т - типу, резонанс, спектр, резонансна частота, хвильовий опір, діелектрична проникність.

УДК 621.391:51(075)

Система раннього попередження про грозову небезпеку / О. А. Серков, С. О. Нікітін, В. І. Кравченко, В. В. Князєв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 95-99. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Розроблено алгоритм розпізнавання та автоматизованого вводу до бази даних картографічної інформації і супутникових карт із накладенням у динамічному режимі відповідних зон виміру та їх результатів. Причому, кожна із зон відображена відповідним кольором, які характеризують рівні грозової небезпеки. Запропоновано метод передачі на центральний комп'ютер за допомогою системи мобільного зв'язку розподіленої інформації про грозову небезпеку із накопиченням її у базі даних. Створена інформаційно-пошукова система, яка побудована на запитах до бази даних, що розміщена на сервері, доступ до якої здійснюють з будь-якого комп'ютера, що входить до глобальної мережі.

Ключові слова: моніторинг грозової небезпеки, розряд блискавки, інтелектуальний аналіз даних, візуалізація, автономний модуль.

УДК 621.314:621.373

Електричні та енергетичні характеристики послідовно-паралельної перетворювальної ланки магнітно-напівпровідникового генератора високовольтних імпульсів / О. І. Христо // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 99-106. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено чисельне моделювання електромагнітних процесів в магнітно - напівпровідниковому генераторі високовольтних імпульсів з послідовно - паралельною перетворювальною ланкою у вхідному контурі. Наведено електричні і магнітні характеристики ланок стиснення для асиметричного режиму коливань генератора і описано процес, що приводить до посилення напруги на поздовжньому конденсаторі паралельної перетворювальної ланки. Отримано графіки електричних та енергетичних характеристик генератора залежно від напруги живлення і еквівалентного опору навантаження. Встановлено діапазон еквівалентних опорів навантаження генератора, при якому досягається найбільша ефективність перетворювальної ланки.

Ключові слова: магнітно – напівпровідниковий генератор, перетворювальна ланка, комутуючий дросель, електричні та енергетичні характеристики.

УДК 537.529:620.3:621.762

Синтез нанодисперсних порошоків карбідів металів електровибуховим методом з використанням вуглецевих наноматеріалів / П. Л. Цолін, Н. І. Кускова, А. Ю. Терехов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 106-112. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведені експериментальні дослідження можливості синтезу карбідів металів електровибуховим методом (у якості провідника використовували вольфрам та молібден). Встановлено, що основним фактором, який впливає на фазовий та дисперсний склади синтезованих нанорозмірних порошоків карбідів, є відношення енергії, що виділилася, до енергії сублімації провідника. Показано, що вихід насичених вуглецем фаз та дисперсність карбідів збільшується, а вміст залишкового металу в продуктах вибуху зменшується з ростом величини енергії.

Ключові слова: електровибух провідників; карбіди металу; нанорозмірні порошки карбідів; паста, що містить вуглецевий наноматеріал, рентгенофазовий аналіз.

УДК 537.52:542.9:661.66

Розрядноімпульсна ініціація процесів саморозподіляючогося високотемпературного синтезу в деяких порошкових системах / Д. І. Челпанов, Н. І. Кускова, А. А. Смалко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 113-118. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-0740.

Розраховано параметри розрядноімпульсної ініціації процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу в системах порошоків складами алюміній + політетрафторетилен і алюміній + композит Ф4К20. Проведено експериментальні дослідження деяких закономірностей та основних параметрів розрядноімпульсної ініціації самопоширюваного синтезу в обраних порошкових системах. Наведено дифрактограми синтезованих порошоків.

Ключові слова: самопоширюваний високотемпературний синтез, розрядноімпульсна ініціація, алюміній, політетрафторетилен, вуглецеві наноматеріали.

УДК 53.088.24

Дослідження впливу відхилення електричної напруги та частоти на покази приладів обліку електричної енергії / С. Ю. Шевченко, В. В. Волохін, С. М. Лебедка, І. М. Дяговченко, М. В. Качан // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 119-125. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Електричну напругу та частоту розглянуто як величини, які носять випадковий характер і підкорюються Гаусівському закону розподілу. За допомогою статистичних методів аналізу даних розглянуто, як впливає відхилення напруги і частоти в межах, що нормуються ГОСТ 13109-97, та поза цими межами на покази приладів обліку електричної енергії. Зроблено висновки щодо доцільності регулювання частоти та напруги в електричних мережах.

Ключові слова: напруга, частота, прилад обліку, лічильник, електрична енергія, мережа, опір, індуктивність, сміність, математичне сподівання, дисперсія, середньоквадратичне відхилення.

РЕФЕРАТЫ

УДК 537.529:544.344.015.4

Математическая модель процесса электровзрыва цилиндрических проводников / В. Ю. Бакларь, Д. И. Челпанов, Н. И. Кускова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 3-7. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Разработана математическая модель электровзрыва цилиндрических проводников, основанная на представлениях о волне испарения. Получены аналитические выражения для временных зависимостей сопротивления, тока, напряжения и давления от параметров электроустановки и характерных размеров проводника в процессе однородного нагрева цилиндрических проводников импульсным током. Экспериментально получены временные зависимости сопротивления, тока и напряжения. Проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: математическая модель, электрический взрыв проводников, согласованный режим электровзрыва, волна испарения.

УДК 621.3.022:537.311.8

Применение мощного высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 для оценки электротермической молниестойкости проводов и кабелей электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики / М.И. Баранов, С.В. Рудаков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 7-12. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты опытной оценки стойкости образцов ряда проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами, полиэтиленовой (ПЭТ) и поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики к воздействию аperiodического импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными по требованиям международных и национальных стандартов амплитудно-временными параметрами (АВП) и допусками на них. Определены максимальные численные значения предельно допустимых и критических плотностей указанного импульса тока искусственной молнии с нормированными АВП и допусками на них в рассматриваемых проводах (кабелях) силовых электрических цепей энергообъектов с ПЭТ и ПВХ изоляцией.

Ключевые слова: мощный высоковольтный генератор тока искусственной молнии; провода и кабели электрических цепей объектов электроэнергетики; молниестойкость кабельно-проводниковой продукции энергообъектов; предельно допустимые и критические плотности импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии в проводах и кабелях энергообъектов.

УДК 519.2

Требования к устройствам блокировки оперативных переключений при разработке и изготовлении новой продукции / Р. К. Борисов, Д. И. Ковалев, Г. М. Колиушко, О. С. Недзельский, Е. Г. Понуждаева // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 12-16. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрены требования к устройствам блокировки оперативных переключений коммутационных аппаратов высокого напряжения, используемых на энергообъектах. Описаны научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию блокирующего устройства нового комплекса электрооборудования для повышения надежности и электробезопасности персонала при производстве оперативных переключений в распределительных устройствах напряжением 6–750 кВ электрических станций и подстанций. Представлена схема электрическая, и описана конструкция опытного образца устройства, прошедшего приемочные испытания в составе комплекса электрооборудования.

Ключевые слова: устройство блокировки, оперативные переключения, коммутационные аппараты, электробезопасность, высокое напряжение, распределительные устройства, электрические станции.

УДК 621.317

Диагностика заземляющих устройств и систем молниезащиты объектов электроэнергетики на современном этапе / О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Д. Г. Колиушко, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко, О. Л. Резинкин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 17-24. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

На основании назначения и состава заземляющего устройства и системы молниезащиты показано основное правило обеспечения электробезопасности. Перечислены недостатки заземляющих устройств, систем молниезащиты и кабельных сооружений. Сформулировано основное правило обеспечения электромагнитной совместимости технических средств, применяемых на электроэнергетических объектах. Приведен перечень испытаний технических средств на устойчивость к нормированным электромагнитным воздействиям. Сформулирован состав работ по диагностике заземляющего устройства и системы молниезащиты, по определению показателей электромагнитной обстановки на действующих объектах. Приведены основные рекомендации по ремонту заземляющих устройств и обеспечению электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: электробезопасность, заземляющее устройство, напряжение прикосновения, система молниезащиты, электромагнитная совместимость, электромагнитная обстановка.

УДК 621.317

Термины и определения по молниезащите ДСТУ EN 62305-X:2012 / О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Д. Г. Колиушко, Г. М. Колиушко, М. М. Резинкина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 24-40. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0740.

Представлен перевод с английского на украинский и русский языки терминов и определений международных стандартов IEC 62305-X:2010 по молниезащите. Общее количество терминов составляет 112 шт. Указаны несоответствия терминов и определений в различных частях международного стандарта. Предлагается заинтересованным специалистам и организациям принять участие в обсуждении, исправлении и дополнении предложенных формулировок. Указано, что действующие в Украине стандарты по молниезащите значительно отличаются друг от друга по форме и содержанию. Предложено отменить стандарт Украины ДСТУ Б В.2.5-38:2008.

Ключевые слова: стандарты по молниезащите, система молниезащиты внешняя и внутренняя, молниеприемники, токоотводы, заземлители, устройства защиты от всплесков.

УДК 621.317.318

Сравнительный анализ методов расчетной оценки количества ударов молнии в объект / В. В. Князев, В. Н. Дронов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 51 (1160). – С. 41-44. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Представлены результаты расчетной оценки количества ожидаемых разрядов молнии в конструкцию типа ангара, проведенные двумя методами: с использованием прикладной программы «Вероятность», разработанной авторами, и формул «3N» из действующих стандартов. В программе реализован электрогеометрический метод (EGM), который является базовым при оценке зон защиты молниеприемников. Рас-

четы проведенны с учетом статистического распределения амплитуд токов молнии в соответствии с параметрами заданными в стандарте IEC 62305-1:2010. Рассмотрен диапазон силы тока молнии (2 – 200) кА, что соответствует I уровню молниезащиты. Вероятность того, что сила тока молнии превысит значение 200 кА не более 1%. Формулы «3Н», применяемые для оценки «площади стягивания» дают завышенный в несколько раз (для рассмотренного объекта в 2,67 раза) результат, поскольку не учитывают реальную форму объекта и статистическое распределение силы тока молнии, определяющего радиус катящейся сферы в EGM методе

Ключевые слова: молния, сила тока, статистическое распределение вероятности, электрогеометрический метод, число ударов молнии, прикладное программное обеспечение.

УДК 621.318

Анализ влияния внешних электромагнитных полей на работоспособность полупроводниковых приборов / В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 45-49. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведен анализ влияния внешних электромагнитных полей на работоспособность полупроводниковых приборов. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, бесстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.318

Влияние неровностей поверхности твердых тел на спектр электронов и плазменных колебаний / В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 49-51. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Определен механизм возникновения поверхностных электронных состояний на периодически неровной границе проводящих твердых тел. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, бесстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.318

Физические модели обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 52-55. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Предложены физические модели появления обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия электромагнитного излучения. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, бесстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.318

Моделирование физических механизмов возникновения необратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 56-59. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Исследованы существующие физические механизмы влияния внешних электромагнитных полей на работоспособность полупроводниковых приборов в области необратимых отказов. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетки, бесстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 544.323.2:544.56.1:621.762

Термодинамический анализ гетерогенных химических реакций в системе «смесь порошков Fe – Ti – углеводородная жидкость» под воздействием высоковольтных электрических разрядов» / Е. В. Липян, О. Н. Сизоненко, А. С. Торпаков, А. А. Жданов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 59-65. – Бібліогр.: 14 назв.

– ISSN 2079-0740.

Приведен термодинамический анализ химического равновесия для смеси порошков железа и титана в среде углеводородной жидкости под воздействием высоковольтных электрических разрядов. Теоретически обоснована возможность получения карбидов и интерметаллидов из исходной смеси и определены необходимые для этого уровни температуры и давления. Полученные теоретические результаты подтверждены экспериментально при синтезе TiC, Fe₃C и Fe₂Ti.

Ключевые слова: термодинамика, энергия Гиббса, парциальное давление, высоковольтный электрический разряд, углеводородная жидкость, синтез, карбиды металлов, интерметаллиды, порошки, рентгенофазовый анализ, гетерогенные реакции, дисперсная система.

УДК 621.315.615:621.319.4

Исследование стабильности электрофизических свойств полиметилсилоксановой жидкости при ее контактировании с пленочными элементами диэлектрических систем высоковольтных импульсных высоковольтных конденсаторов под действием высоких температур / А.П.Малюшевская, С.О.Топоров // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 66-69. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Изучено изменение электрофизических свойств полиметилсилоксановой (ПМС) жидкости как такой, которая может использоваться для пропитки пленочных диэлектрических систем высоковольтных импульсных конденсаторов. Определена низкая степень термостимулированного взаимодействия полиметилсилоксановой жидкости с полипропиленовой и полиэтилентерефталатной пленками. На примере жидкости ПМС-20 показана высокая термостабильность электрофизических свойств органосилоксановых жидкостей за исключением высокой чувствительности ее кратковременной электрической прочности к возникновению электроразрядных явлений.

Ключевые слова: пропитанный пленочный диэлектрик, органосилоксановые жидкости, кратковременная электрическая прочность.

УДК 621.317.3

Генератор для испытаний БАО на восприимчивость к переходным процессам, вызванных молнией («многократные удары» формы 5А) ИГЛА-МКУ-5А / Ю. С. Немченко, В. В. Князев, И. П. Лесной, С. Б. Сомхив // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 70-73. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Описана конструкция и результаты аттестации генератора, предназначенного для испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией «многократные удары» формы 5А, в соответствии с требованиями международных стандартов. Генератор производит циклограммы импульсов тока формы 5А по 5-ти уровням испытаний. Каждая циклограмма состоит из испытательных пакетов импульсов от 1 до 999, а в каждом испытательном пакете – 14 испытательных импульсов.

Ключевые слова: испытание, бортовое оборудование, невосприимчивость, молния, переходные процессы, генератор, аттестация.

УДК 004.056

Методы обеспечения целостности информации в инфокоммуникационных системах / В.Я.Певнев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 74-77. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Обоснована проблема целостности информации как наиболее уязвимого звена в обеспечении информационной безопасности. Рассмотрены угрозы целостности на различных этапах жизненного цикла информации. Представлены основные методы обеспечения целостности информации. В каждом из рассмотренных методов выделены основные угрозы и пути их решения. Комплексное использование рассмотренных организационных, технических, программных решений позволяет обеспечить целостность информации как основополагающей составляющей информационной безопасности систем.

Ключевые слова: целостность информации, угрозы, жизненный цикл, методы обеспечения, информационная безопасность.

УДК 551.594

Моделирование поражения плоскости разрядом длинной искры с использованием многошаговой модели / А. А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 78-82. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Показано, что предложенная модель для диапазона изменения высот ориентировки от 0,78 м до 5 м адекватно описывает распределение точек поражения плоскости длинной искрой. Близкие значения вариативных параметров модели позволяют предложить модель для прогнозирования распределения точек поражения плоскости при больших значениях высоты ориентировки для геометрически подобных разрядных промежутков. Материалы работы могут быть использованы для построения моделей поражения длинной искрой объектов, расположенных на плоской поверхности.

Ключевые слова: математическая модель, функция распределения, случайная величина, разряд длинной искры.

УДК 621.317.08

Моделирование электромагнитной обстановки в помещении аппаратной киноконцертного комплекса / В.В. Пилинский, А.С. Чупахин, Р.А. Сирота // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 83-86. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0740.

Выполнена оценка уровней электромагнитных полей внутри помещения аппаратной. Проанализировано оборудование аппаратной киноконцертного комплекса, как источников, рецепторов непреднамеренных электромагнитных помех. Предложен алгоритм описания электромагнитной обстановки внутри помещения киноконцертного комплекса, оборудованного функциональной аппаратурой различного назначения. Реализована прикладная программа, в которой использована методика итеративного моделирования. Представлены результаты моделирования электромагнитных полей внутри помещения аппаратной киноконцертного комплекса.

Ключевые слова: электромагнитная обстановка, электромагнитная совместимость, киноконцертный комплекс, источник помех, рецептор помех, нормы эмиссии, чувствительность, прогнозирование, моделирование.

УДК 621.317.318

Сравнительный анализ средств измерения напряженности электростатического поля в атмосфере в предгрозовой обстановке / И. А. Постельник, С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 87-91. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведен сравнительный анализ средств измерения напряженности электростатического поля в атмосфере Земли в предгрозовой обстановке. Рассмотрены физические основы метода измерения напряженности электростатического поля посредством электрической индукции. Указаны основные преимущества и недостатки средств измерения, использующих метод электрической индукции. Содержится описание технологии микромеханических средств измерения напряженности электростатического поля. Показана возможность локального мониторинга предгрозовой обстановки, для определения вероятности возникновения молниевых разрядов за счет измерения электростатического поля, возникающего между заряженным облаком и поверхностью земли.

Ключевые слова: электростатическое поле, роторный вольтметр, вибрационный вольтметр, МЭМС технология, молния, заряды, электрическая индукция.

УДК 621.317.39.084.2

Исследования метрологических характеристик измерительных преобразователей в виде ступенчатого коаксиального неоднородного резонатора для диэлькометрии жидких сред в СВЧ диапазоне / В.В. Рудаков, А.А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 91-95. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведены исследования электромагнитных процессов в ступенчатом неоднородном коаксиальном резонаторе. Исследования проведены для случая идеальных линий, по которым распространяется исключительно электромагнитные волны Т - типа. Получено обобщенное выражение для спектра резонансных частот, которое позволяет определить частоты резонанса при любых сочетаниях геометрических параметров и электрических характеристик элементов резонатора. Усовершенствована конструкция резонатора с целью получения минимального значения первой резонансной частоты при его минимальных размерах. Получено точное выражение для первой резонансной частоты исследуемого резонатора. Показано полное совпадение результатов исследований с полученными ранее результатами имитационного моделирования. Определена метрологическая характеристика резонатора – зависимость частоты первого резонанса от диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости, что позволяет применять его для диэлькометрии жидких сред в СВЧ диапазоне.

Ключевые слова: ступенчатый неоднородный резонатор, электромагнитные волны Т - типа, резонанс, спектр, резонансная частота, волновое сопротивление, диэлектрическая проницаемость.

УДК 621.391:51(075)

Система раннего предупреждения грозовой опасности / А. А. Серков, С. А. Никитин, В. И. Кравченко, В.В. Князев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 95-99. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Разработан алгоритм распознавания и автоматизированного ввода в базу данных картографической информации и спутниковых карт, с наложением в динамическом режиме соответствующих зон измерения и их результатов. Причем, каждая из зон оттенена определенным цветом, характеризующим уровни грозовой опасности. Предложен метод передачи на центральный компьютер с помощью системы мобильной связи распределенной информации о грозовой опасности с накопленным ее в базе данных. Создана информационно-поисковая система, построенная на запросах к базе данных, размещенной на сервере, доступ которой осуществляется с любого компьютера, входящего в глобальную сеть.

Ключевые слова: мониторинг грозовой опасности; разряд молнии; интеллектуальный анализ данных; визуализация; автономный модуль.

УДК 621.314:621.373

Электрические и энергетические характеристики последовательно-параллельного преобразовательного звена магнитно-полупроводникового генератора высоковольтных импульсов / А.И. Христо // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 99-106. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено численное моделирование электромагнитных процессов в магнитно-полупроводниковом генераторе высоковольтных импульсов с последовательно - параллельным преобразовательным звеном во входном контуре. Приведены электрические и магнитные характеристики звеньев сжатия для асимметричного режима колебаний генератора и описан процесс, приводящий к усилению напряжения на продольном конденсаторе параллельного преобразовательного звена. Получены графики электрических и энергетических характеристик генератора в зависимости от питающего напряжения и эквивалентного сопротивления нагрузки. Установлен диапазон эквивалентных сопротивлений нагрузки генератора, при котором достигается наибольшая эффективность преобразовательного звена.

Ключевые слова: магнитно-полупроводниковый генератор, преобразовательное звено, коммутирующий дроссель, электрические и энергетические характеристики.

УДК 537.529:620.3:621.762

Синтез нанодispersных порошков карбидов металлов электровзрывным методом с использованием углеродных наноматериалов / П. Л. Цолин, Н. И. Кускова, А. Ю. Терехов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 106-112. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведены экспериментальные исследования возможности синтеза карбидов металлов электровзрывным методом (в качестве проводника использовали вольфрам и молибден). Установлено, что основным фактором, влияющим на фазовый и дисперсный составы синтезированных наноразмерных порошков карбидов, является отношение выделившейся энергии к энергии сублимации проводника. Показано, что выход насыщенных углеродом фаз и дисперсность карбидов возрастает, а содержание остаточного металла в продуктах взрыва уменьшается с ростом величины энергии.

Ключевые слова: электровзрыв проводников; карбиды металла; наноразмерные порошки карбидов; паста, содержащая углеродный наноматериал; рентгенофазовый анализ.

УДК 537.52:542.9:661.66

Разрядноимпульсная инициация процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в некоторых порошковых системах / Д. И. Челпанов, Н. И. Кускова, А. А. Смалко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 113-118. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассчитаны параметры разрядноимпульсной инициации процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в системах порошков составами алюминий + политетрафторэтилен и алюминий + композит Ф4К20. Проведены экспериментальные исследования некоторых закономерностей и основных параметров разрядноимпульсной инициации самораспространяющегося синтеза в выбранных порошковых системах. Приведены дифрактограммы синтезированных порошков.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, разрядноимпульсная инициация, алюминий, политетрафторэтилен, углеродные наноматериалы.

УДК 53.088.24

Исследование влияния отклонения электрического напряжения и частоты на показания приборов учета электрической энергии / С. Ю. Шевченко, В. В. Волохин, С. Н. Лебедка, И. Н. Дяговченко, М. В. Качан // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 51 (1160). – С. 119-125. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Электрическое напряжение и частота рассмотрены как величины, которые носят случайный характер и подчиняются Гауссовскому закону распределения. С помощью статистических методов анализа данных рассмотрено, как влияют отклонения напряжения и частоты в пределах, которые нормируются ГОСТ 13109-97, и выходят за эти пределы на показания приборов учета электрической энергии. Сделаны выводы относительно целесообразности регулирования частоты и напряжения в электрических сетях.

Ключевые слова: напряжение, частота, прибор учета, счетчик, электрическая энергия, сеть, сопротивление, индуктивность, емкость, математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратическое отклонение.

ABSTRACTS

Mathematical model of the process of electrical explosion of cylindrical conductors / V. Yu. Baklar, N. I. Kuskova, D. I. Chelpanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – C. 3-7. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0740.

The mathematical model of electrical explosion of cylindrical conductors which is based on representations of evaporation wave was developed. Analytical expressions for temporal dependences of resistance, current, voltage and pressure on the parameters of electrical equipment and characteristic sizes of conductor in the process of the homogeneous heating by the impulse current of cylindrical conductors were obtained. Temporal dependences of resistance, current and voltage were experimentally obtained. Qualitative comparison of the developed mathematical model with the results of experimental researches was conducted. Analytical expressions, establishing a connection between impulse pressure in an exploding conductor and electrical power parameters, properties of material and sizes of conductor and external terms, were obtained.

Keywords: mathematical model, electrical explosion of conductors, matched regime of electrical explosion, evaporation wave.

Application of powerful high-voltage generator of GICL-10/350 for an estimation electro-thermal resistibility to lightning send-offs and cables of electric chains of objects of industrial electroenergy / M.I. Baranov, S.V. Rudakov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – C. 7-12. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

The results of experimental estimation of resistibility of standards of row of send-offs and cables are resulted with copper (aluminium) tendons, by the polyethylene (PET) and polyvinylchloride (PVKH) isolation of electric chains of objects of industrial electroenergy to action of aperiodic impulse of current 10/350 μ s of artificial lightning with rationed on the requirements of international and national standards peak-temporal parameters (PTP) and admittances on them. Maximal numeral values maximum of possible and critical closeness of the indicated impulse of current of artificial lightning are certain with rationed PTP and admittances on them in the examined send-offs (cables) of power electric circuits of power objects with PET and PVKH by an isolation.

Keywords: powerful high-voltage generator of current of artificial lightning; wires and cables of electric chains of objects of electroenergy; resistibility to lightning of cable-explorer products of power objects; maximum possible and critical closeness of impulse of current 10/350 μ s of artificial lightning in send-offs and cables of power objects.

The requirements to blocking devices routine switching of design and making new production / R. K. Borisov, D. I. Kovalev, G. M. Koliushko, O. S. Nedzelskiy, H. G. Ponuzhdayeva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – C. 12-16. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0740.

The requirements to blocking device of high voltage routine switching devices, used on power facilities, were considered. The research and design work of blocking device's creation for new electric equipment were described. This electric equipment is designed for staff's reliability improvement and electrical safety during the execution of routine switching in distributing gear with 6–750 kV voltage, situated in power plants and power substations. The electrical drawing is presented and the design of experimental model with completed acceptance trials within the set of electric equipment is described. The devices that have been developed are appointed to complete the new "intellectual" systems to provide the safety blocking of operative commutations.

Keywords: blocking device, routine switching, switching devices, electrical safety, high voltage, distributing gear, power plants

Testing of a grounding systems and lightning protection system of power industry objects on present days / O. Y. Glybov, S. V. Kiprych, D. G. Koliushko, G. M. Koliushko, A. V. Plichko, O. L. Rezinkin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – C. 17-24. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

The main rule of electrical safety assurance are shown on the ground of function and structures of grounding systems and lightning protection systems. General defects of grounding systems, lightning protection systems and cable works are described. The main rule of electromagnetic compatibility assurance of devices, which is used by energy objects, is formulated. The list of normative electromagnetic influence immunity tests is presented. The list of testing procedures of grounding systems and lightning protection systems also for determination of electromagnetic environment factors for the objects, which are operated, are given. General recommendations for renovation of grounding systems and electromagnetic compatibility assurance are given.

Keywords: electrical safety, grounding systems, contact voltage, lightning protection systems, immunity tests, electromagnetic compatibility, electromagnetic environment.

Lightning protection terms and definitions ДСТУ EN 62305- X:2012 / O. Y. Glybov, S. V. Kiprych, D. G. Koliushko, G. M. Koliushko, M. M. Rezinkina // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – C. 24-40. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0740.

Translation from English to Ukrainian and Russian languages of lightning protection terms and definitions of International Standards IEC 62305-X:2010 is presented in the paper. Total amount of terms is 112. Misfits of terms and definitions in different parts of International Standard are shown. It is proposed for interested specialists and organizations to take part in discussion, correction and addition of proposed formulations. It is shown, that operating Ukrainian standards in lightning protection are significantly differ each other both form and content. It is proposed to abate the Ukrainian standard ДСТУ Б В.2.5-38:2008.

Keywords: lightning protection standards, internal and external lightning protection system, air terminations, down conductors, earth terminations, surge protective devices.

The comparative analysis of the methods of estimation the number of lightning strikes in the object / V.V. Kniaziev, V.M. Dronov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – C. 41-44. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0740.

The results of the estimate of the expected number of lightning strikes in the construction of the hangar-type conducted in two ways: using the application "Likelihood", developed by the authors, and formulas "3H" of existing standards. The program is implemented electro geometrical method (EGM), which is the base for assessing the protection zone lightning rods. The calculations were performed taking into account the statistical distribution of the amplitudes of lightning currents in accordance with the parameters specified in the standard IEC 62305-1: 2010. Considered a range of the lightning current (2 - 200) kA, which corresponds to the I level lightning protection. The likelihood that the force of the lightning current exceeds 200 kA is not more than 1%. Formula "3H" used to assess "the area contraction" gives inflated several times (for the considered object 2.67 times) the result, because it does not take into account the real shape of the object and the statistical distribution of the lightning current, which determines the radius of the rolling sphere in EGM method.

Keywords: lightning current, the statistical probability distribution, electro geometrical method, the number of lightning strikes, the application software.

Analysis of the influence of external electromagnetic fields on the working capacity of semi-conductor devices / V.I.Kravchenko, A.A.Serkov, V.S.Breslavets, I.V.Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 45-49. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arching on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields have been determined. The development of theory of interaction of microwave electromagnetic oscillations and charged particles in bounded plasma-like media and the study of kinetic and hydrodynamic beam instabilities in solid –like structures applied in the present microwave electronics is proposed. The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor superstructure have been determined. A new mechanism of initiation of surface at uneven of the conducting solid bodies is proposed. A theory of collisionless damping of surface plasmons in quantum and classical approximations is elaborated and the conditions of its conversion are determined. The effect of inhomogeneous properties of surface of open radiating structures on the spectral characteristics of transition radiation is studied. It is found that the energy losses related to excitation of volume helicons are equivalent to the energy losses of a magnetic moment created due to the charge rotation. New mechanism of excitation of surface magnetoplasma oscillations by the moving radiation source are suggested.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor superlattices, collisionless extinction, kinetic and hydrodynamic instability, generation, cherenkov and transition radiation, helicon, charged particles, surface waves.

Influence of the roughnesses of the solids surface on the electrons spectrum and plasma fluctuations / V.I.Kravchenko, A.A.Serkov, V.S.Breslavets, I.V.Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 49-51. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

The mechanism of occurrence of surface electron states at periodically uneven border conductive solids are determined. Mechanisms of instabilities of the natural oscillations of semiconductor superlattices has been studied. Due to their interaction with streams of charged particles under the influence of the external electromagnetic shown that the effect of pulsed electromagnetic radiation accompanied by the emergence of currents in conductive products and the emergence of elements of their internal fields. agnitogo radiation. A new mechanism for the appearance of surface Electronical states on an uneven surface conductive solids. The effect of inhomogeneous surface properties of conductive solids emitting structures on the spectral characteristics of Cherenkov radiation and transition The theory of collisionless damping poverhnostnih polaritons in quantum and classical approximations.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor superlattices, collisionless extinction, kinetic and hydrodynamic instability, generation, cherenkov and transition radiation, helicon, charged particles, surface waves.

Physical models of reversible refusals of semi-conductor devices under an electromagnetic / V.I.Kravchenko, A.A.Serkov, V.S.Breslavets, I.V.Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 52-55. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

A new mechanism of initiation of surface at uneven of the conducting solid bodies is proposed. The development of theory of interaction of microwave electromagnetic oscillations and charged particles in bounded plasma-like media and the study of kinetic and hydrodynamic beam instabilities in solid –like structures applied in the present microwave electronics is proposed. The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor superstructure have been determined. The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields. A theory of collisionless damping of surface plasmas in quantum and classical approximations is elaborated and the conditions of its conversion are determined. The effect of inhomogeneous properties of surface of open radiating structures on the spectral characteristics of transition radiation is studied. It is found that the energy losses related to excitation of volume helicons are equivalent to the energy losses of a magnetic moment created due to the charge rotation. New mechanism of excitation of surface magneto plasmas of oscillations by the moving radiation source is suggested.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor superlattices, collisionless extinction, kinetic and hydrodynamic instability, generation, cherenkov and transition radiation, helicon, charged particles, surface waves.

Modeling of physical mechanisms of the occurrence of irreversible refusals of semi-conductor devices under an electromagnetic influence / V.I.Kravchenko, A.A.Serkov, V.S.Breslavets, I.V.Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 56-59. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor superstructure have been determined. New mechanism of excitation of surface magnetoplasma of oscillations by the moving radiation source are suggested. The development of theory of interaction of microwave electromagnetic oscillations and charged particles in bounded plasma-like media and the study of kinetic and hydrodynamic beam instabilities in solid –like structures applied in the present microwave electronics is proposed. The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields. A new mechanism of initiation of surface at uneven of the conducting solid bodies is proposed. A theory of collisionless damping of surface plasmas in quantum and classical appreciations is elaborated and the conditions of its conversion are determined. The effect of inhomogeneous properties of surface of open radiating structures on the spectral characteristics of transition radiation is studied. It is found that the energy losses related to excitation of volume helicons are equivalent to the energy losses of a magnetic moment created due to the charge rotation.

Keywords: electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor superlattices, collisionless extinction, kinetic and hydrodynamic instability, generation, cherenkov and transition radiation, helicon, charged particles, surface waves.

Thermodynamical analysis of heterogeneous chemical reactions in "Fe – Ti powder mixture – hydrocarbon liquid" system under the impact of high voltage electric discharges / Ye. V. Lypian, O. M. Syzonenko, A. S. Torpakov, O. O. Zhdanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 59-65. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0740.

Thermodynamical analysis of chemical equilibrium for Ferrum and Titanium powders mixture in hydrocarbon liquid medium under the impact of high voltage electric discharges is given. Possibility for obtainment of carbides and intermetallic compounds from components of initial mixture in different phase state is theoretically justified. It is found out that synthesis of Fe₂Ti and TiC is thermodynamically possible at temperatures higher than 300 K and synthesis of Fe₃C and FeTi is possible at temperatures higher than 1100 K. Obtained theoretical results are experimentally confirmed by synthesis of TiC, Fe₃C and Fe₂Ti in Fe – Ti powder mixture after high voltage electric discharge treatment in kerosene.

Keywords: thermodynamics, Gibbs free energy, partial pressure, high-voltage electric discharge, hydrocarbon liquid, synthesis, metal carbides, intermetallic compounds, powders, powder X-ray diffraction, heterogeneous reactions, dispersed system.

Research of electrophysical properties of polymethylsiloxane fluid in contact with film elements of high-voltage pulse capacitors' dielectric systems stability under the elevated temperatures influence / A.P.Malyushevskya, S.O.Toporov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 66-69. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

Change of electrophysical properties of polymethylsiloxane (PMS) liquid as the impregnative liquid for film dielectric systems of high-voltage pulse capacitors is researched. The aim of this investigation is the ascertainment of factors, which have an influence on the functionality of polymethylsiloxane liquid as the impregnant electrical insulating component of high voltage capacitors' dielectric systems during their thermoaging. The low level of thermostimulated interaction between polymethylsiloxane liquid and both polypropylene and polyethyleneterephthalat films is defined. By way of the PMS-20 liquid example high thermostability of electrophysical properties of the organic-siloxane liquids is demonstrated, except of high sensitivity of its short-time electric strength to the electrical discharge phenomena origin. It is necessary to limit the strength of electric field in the specific impregnant dielectric system by the determination of initial partial discharges' voltage in case of polymethylsiloxane liquid usage.

Keywords: film impregnated dielectric, organosiloxane liquid, short-term electrical strength.

Generator intended for testing of the BAO on susceptibility to fast transient/burst, caused lightning ("multiple strokes" of the form 5A) IGLA-MKU-5A / Y.S.Nemchenko; V.V.Kniyaziev, I.P.Lesnoy; S.B.Somhiev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 70-73. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0740.

The construction and the testing of the attestation of the generator intended for testing of the on-board aircraft equipment on susceptibility to fast transient/burst, caused lightning, according to International standards are described. The apparatus generates the mission profile of the test current of the form 5A on five levels. Every character of change consists of proof-test packages of impulses from 1 to 999, and in every proof-test package are 14 proof-test impulses, interval between proof-test impulses in a proof-test package from 10 ms to 200 ms, duration of proof-test package to 1,5 s; thus, amplitude of 1th impulse exactly in two times more than at 13 subsequent. The generator of IGLA-MKU-5A well went primary attestation with participation the representatives of GP «Kharkovstandartmetrologija» on worked out in NIPKI «Molnija» NTU «HPI» to the corresponding program and methodology of attestation. The generator of IGLA-MKU-5A brought into operation and participated in the tests of on-board aircraft equipment on susceptibility to fast transient/burst, caused lightning, by a method «Input in grounding» by the proof-test currents of form of 5A.

Keywords: test, on-board aircraft equipment, susceptibility, lightning, transients, generator, attestation.

Methods of ensuring the integrity of information in info-communication systems / V.Ya.Pevnev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 74-77. – Bibliogr.: 21. – ISSN 2079-0740.

The problem of integrity of information as the most vulnerable link in information security is justified. Threats of the integrity at different stages of the life cycle of information are considered. Basic methods for ensuring the integrity of information are presented. The reliability of technical means used to ensure the integrity of information is considered in details. The possibilities of building redundant systems, taking into account both technical and informational components are discussed. Particular attention is paid to the possibility of countering the electron magnetic pulse using various remedies. In each of the methods the main threats and their solutions are identified. Integrated use of the considered organizational, technical, software solutions ensures the integrity of information as a fundamental component of the information security systems.

Keywords: integrity of information, threats, life cycle, methods of providing, information security.

Modeling defeat plane long spark discharge using a multi-step model / A. A. Petkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 78-82. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

The relations for determining the angle of the random motion of the long spark. A multistage model plane defeat long spark. The model includes simulation and minimization procedure. The model used to describe the distribution of points defeat long spark endless flat surface. The comparison of the simulation results and experimental data. Checked the adequacy of the model using the Kolmogorov test. Adequacy of the model for the discharge gaps length from 0.78 m to 5 m. The model allows to predict the distribution of points defeat for discharge gaps length more than 5 m. Materials of the work can be used to construct models of the long spark destruction facilities that are situated on a flat surface.

Keywords: mathematical model, distribution function, random variable, long spark discharge.

Simulation electromagnetic environment in control rooms cinema and concert hall / V.V. Pilinsky, A.S. Chupakhin, R.A. Sirota // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 83-86. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-0740.

Objective: development of a software module, as the basis of an automated system for monitoring the electromagnetic space of cinema and concert complexes for decision-making EMC functional equipment. The estimated levels of an electromagnetic field inside hardware equipment of the cinema and concert complexes. To analyze cinema and concert complex equipment hardware: both the source and the receptor of unintentional electromagnetic interference. The proposed algorithm describes electromagnetic environment of a cinema or concert complex, equipped with functional equipment for various purposes. To implement a computer simulation program, which represents the results of simulation of electromagnetic fields in indoor cinema and concert complex hardware. To identify areas in rooms with high levels of electric field strength, which significantly affects the total aggregate level of the electric field strength and the formation of different sources of unintentional electromagnetic interference. To describe electromagnetic environment inside the room using the iterative modeling method. The peculiarity of the proposed method is based on: the floor area is divided into a grid of individual cells, and the simulation results can be the electric field modeled inside each cell. The program implements the calculation of the total level of the electric field strength from all the sources of emission located in hardware according to the principle of superposition for the same frequency, also provides information about the impact of each source separately in the form of a pie chart. The results allow designers to make informed decisions about the need for additional funds to ensure the electromagnetic compatibility in each room, such as: physical separation equipment, the use of protective screens etc.

Keywords: electromagnetic environment, electromagnetic compatibility, cinema and concert hall, program, interference source, interference receptor, emission limits, susceptibility, forecasting, simulation.

The comparative analysis of the measurement means of electrostatic field of atmosphere in before thunderstorm situation / I. O. Postilnyk, S. P. Shalamov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 87-91. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

The measurement means of electrostatic field of atmosphere in before thunderstorm situation are described. The conditions of appearance the lightning the bound with electrostatic field of atmosphere are shown in paper. The Law of the electrostatic induction is reviewed. Advantages and disadvantages of the measurement means of electrostatic field based on electrostatic induction were analyzed. A MEMS-based electric-field meter is considered for measuring electrostatic field. The opportunity of the application of measurement means in local warning system of lightning storms is shown. The rotary voltmeter was described and designed. Its main advantages allow to chose technique for measuring electrostatic field of atmosphere in before thunderstorm situation.

Keywords: electrostatic field, the rotary voltmeter, voltmeter vibration, MEMS technology, lightning, charges, electric induction.

Research of metrological characteristics of measuring transducers in the form of a stepped coaxial resonator for inhomogeneous dielectric measurement of liquids in the UHF range / V. V. Rudakov, A. A. Korobko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 91-95. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0740.

The researches of electromagnetic processes in inhomogeneous stepped coaxial resonator have been investigated. Investigations are carried out for the case of ideal lines, which covers only the T - type electromagnetic waves. A generalized expression for the spectrum of resonance frequencies, which allows you to determine the frequency of resonance with any combination of geometric parameters and electrical characteristics of the resonator elements, is obtained. The resonator design is optimized in order to obtain the minimum value of the first resonant frequency by its the minimum size. The first resonance frequency has a minimum value when length of a short-circuit and open at the end lines are equal. An exact expression for the first resonant frequency of the optimized resonator is received. The ratio of the impedances of short-circuits and open at the end lines has the most impact on the first resonant frequency. With an increase in this ratio the value first resonance frequency decreases. Full match research results with previous simulation results shown. The metrological characteristics of the resonator are determined as the first resonance frequency dependence of the dielectric constant of the liquid sample, so that it can be used for liquids dielectric measurements in the UHF range.

Keywords: inhomogeneous stepped resonator, T - type electromagnetic waves, resonance, range, resonant frequency, wave resistance, dielectric permittivity.

Thunderstorm hazards early warning system / A. A. Serkov, S. A. Nikitin, V. I. Kravchenko, V.V. Knyazev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 95-99. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

The algorithm was proposed for recognition and automatic input of cartographic information and satellite maps into the database with dynamically overlay of relevant measuring zones and measuring results. Each zone is shaded in different colors according to the level of storm danger. It was proposed the method for transmission of distributed information about the storm danger to the central computer via the mobile communication system. Transmitted data are accumulated in the database. It was created the information retrieval system based on queries to a database hosted on the server, access to which is carried out from any computer of the global network.

Keywords: thunderstorm hazards monitoring; lightning strike; intelligent data analysis; visualization; stand-alone module.

Electric and power characteristics of the series - parallel conversion unit of magnetic - semiconductor of high-voltage pulse generator / A.I. Khristo // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 99-106. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

The numerical simulation of electromagnetic processes in magnetic semiconductor generator of high-voltage pulses with series-parallel conversion unit in the input circuit is conducted. Electrical and magnetic characteristics of the compression units for the symmetric regime of oscillations of the generator are given and describes a process that leads to increased the voltage across the longitudinal capacitor of parallel conversion unit. Electric and power characteristics of the generator in dependence on the input voltage and the equivalent load resistance are shown. It is shown that a family of characteristics of the peak values of voltage and current through the transducer element and the stored energy in the longitudinal capacitor have a similar character and are described by a nonlinear increasing dependence. The input voltage limits of the magnetic pulse generator which achieve the highest efficiency of the conversion unit are defined. It is shown that the linearity characteristics of conversion unit in the appropriate range of load resistances at a definite value of the input voltage, is explained by agreed energy transfer from a capacitor parallel conversion unit in the high voltage capacitor.

Keywords: magnetic semiconductor generator, conversion unit, switching choke, electric and power characteristics.

Synthesis of carbides of molybdenum by electrodischarge method / P. L. TsoLin, Kuskova N. I., Terekhov A. Yu. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 106-112. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0740.

Processes of synthesis of nanodispersed powders of carbides in the process of electrical explosion of tungsten and molybdenum conductors in the paste containing carbon nanomaterials are experimentally investigated. The paste is obtained by the method of electric discharge treatment of liquid hydrocarbons. It is established that the main factor influencing the dispersed phase and the compositions of the synthesized powders of carbides of tungsten and molybdenum is the ratio of the energy released in a conductor to the energy of conductor's sublimation. It is shown that the output of carbon-saturated phases and dispersion of carbides increases and the content of residual metal in explosion products decreases with increasing magnitude of input energy.

Keywords: electrical explosion of conductors; metal carbides; nanosized carbide powders; paste with carbon nanomaterials; x-ray diffraction analysis.

Pulse discharge initiation of self-propagating high-temperature synthesis processes in some powder systems / D. I. Chelpanov, N. I. Kuskova, A. A. Smalko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 113-118. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-0740.

The parameters of pulse discharge initiation of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) in the powder systems of aluminum + polytetrafluoroethylene and aluminum + F4K20 composite were calculated. Laboratory facility of pulse discharge SHS initiation was designed and constructed. Experimental studies of some patterns and main parameters of the SHS process in selected powder systems were conducted (typical ignition and combustion temperatures, wave front propagation velocity, rate of the substance heating in a wave, the width of the heating zone etc.). The results of X-ray diffraction analysis of the synthesized powders showed the presence of carbon nanomaterials in them.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, pulse discharge initiation, aluminum, polytetrafluoroethylene, carbon nanomaterials.

Studying the influence of voltage and frequency deviations on the electric energy metering devices indications / S. Yu. Shevchenko, V. V. Volokhin, S. M. Lebedka, I. M. Dyahovchenko, M. V. Kachan // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 51 (1160). – С. 119-125. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

Shown that voltage and frequency could be considered as quantities that are random and obey a Gaussian distribution law. This statement is confirmed by the results of Pearson's chi-squared test. With help of statistical methods of data analysis the studying of the influence of voltage and frequency deviations on electric grid parameters and electric energy meter's indications was made. The research conducted with use the simulation of electricity meter's work in software environment Borland C++. The deviations of voltage and frequency were considered within the limits stated in HOST 13109-97 and also out of these limits. The conclusions about advisability of voltage and frequency regulation in electrical network were made.

Keywords: voltage, frequency, meter, electric energy, electrical network, resistance, inductance, capacitance, mathematical expectation, variance, standard deviation.

ЗМІСТ

В. Ю. Бакларь, Н. И. Кускова, Д. И. Челпанов Математическая модель процесса электровзрыва цилиндрических проводников	3
М.И. Баранов, С.В. Рудаков Применение мощного высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 для оценки электротермической молниестойкости проводов и кабелей электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики	5
Р. К. Борисов, Д. И. Ковалев, Г. М. Колиушко, О. С. Недельский, Е. Г. Понуждаева Требования к устройствам блокировки оперативных переключений при разработке и изготовлении новой продукции	10
О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Д. Г. Колиушко, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко, О. Л. Резинкин Диагностика заземляющих устройств и систем молниезащиты объектов электроэнергетики на современном этапе	15
О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Д. Г. Колиушко, Г. М. Колиушко, М. М. Резинкина Термины и определения по молниезащите ДСТУ EN 62305-X:2012	22
В.В. Князев, В.Н. Дронов Сравнительный анализ методов расчетной оценки количества ударов молнии в объект	41
В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.В. Яковенко Анализ влияния внешних электромагнитных полей на работоспособность полупроводниковых приборов	45
В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.В. Яковенко Влияние неровностей поверхности твердых тел на спектр электронов и плазменных колебаний	49
В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.В. Яковенко Физические модели обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях электромагнитного воздействия	52
В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И.В. Яковенко Моделирование физических механизмов возникновения необратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях электромагнитного воздействия	56
Е. В. Лилян, О. Н. Сизоненко, А. С. Торпаков, А. А. Жданов Термодинамический анализ гетерогенных химических реакций в системе «Смесь порошков Fe – Ti – углеводородная жидкость» под воздействием высоковольтных электрических разрядов	59
А.П. Малюшевська, С.О. Топоров Вивчення стабільності електрофізичних властивостей поліметилсилоксанової рідини при її контактуванні з плівковими елементами діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів під дією підвищених температур	66
Ю. С. Немченко, В. В. Князев, И. П. Лесной, С. Б. Сомхивев Генератор для испытаний БАО на восприимчивость к переходным процессам, вызванных молнией («многократные удары» формы 5А) ИГЛА-МКУ-5А	70
В. Я. Певнев Методы обеспечения целостности информации в инфокоммуникационных системах	74
А. А. Петков Моделирование поражения плоскости разрядом длинной искры с использованием многошаговой модели	78
В. В. Пилинский, А. С. Чупахин, Р. А. Сирота Моделирование электромагнитной обстановки в помещении аппаратной киноконцертного комплекса	83
И. А. Постельник, С. П. Шаламов Сравнительный анализ средств измерения атмосферного электростатического поля в предгрозовой обстановке	87
В. В. Рудаков, А. А. Коробко Исследования метрологических характеристик измерительных преобразователей в виде ступенчатого коаксиального неоднородного резонатора для диэлькометрии жидких сред в СВЧ диапазоне	91
А. А. Серков, С. А. Никитин, В. И. Кравченко В. В. Князев Система раннего предупреждения грозовой опасности	95
А. И. Христо Электрические и энергетические характеристики последовательно - параллельного преобразовательного звена магнитно -полупроводникового генератора высоковольтных импульсов	99
П. Л. Цолин, А. Ю. Терехов Синтез нанодисперсных порошков карбидов металлов электровзрывным методом с использованием углеродных наноматериалов	106
Д. И. Челпанов, Н. И. Кускова, А. А. Смалько Разрядноимпульсная инициация процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в некоторых порошковых системах	113
С. Ю. Шевченко, В. В. Волохін, С. М. Лебедка, І. М. Дяговченко, М. В. Качан Дослідження впливу відхилення електричної напруги та частоти на покази приладів обліку електричної енергії	119
Реферати	126
Рефераты	130
Abstracts	134

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Збірник наукових праць

Серія:
Техніка та електрофізика високих напруг

№ 51 (1160)

Науковий редактор: д-р техн. наук, проф. В. І. Кравченко
Технічний редактор: канд. фіз.-мат наук, ст. наук. співр. Л. В. Ваврів
Відповідальний за випуск: канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.
НТУ «ХПІ». НДПКІ «Молнія».
Тел. (057) 707-63-09. E-mail: vavriv@rambler.ru

Обл.-вид № 48-15.

Підп. до друку 20.11.2015 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,75. Облік.-вид. арк. 10.
Тираж 300 пр. 1-й завод 1-100. Зам. № 23. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Друкарня ВАТ «Цифра Прінт».

Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.

Адреса: 61166, м. Харків, вул. Данилевського, 30.
