



ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
«XIII»

50'2014

Харків

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

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

*Серія: Техніка та електрофізика
високих напруг*

№ 50 (1092) 2014

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2014

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 50 (1092). – 196 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

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. СПІФАНОВ, 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.;

С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; В. М. КОШЕЛЬНИК, 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.;

Р. К. БОРИСОВ, канд. техн. наук; 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.;

К. Ю. САХАРОВ, д-р техн. наук; 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 31 жовтня 2014 р.

ISSN 2079-0740

© Національний технічний університет «ХПІ», 2014

В.Ю. БАКЛАРЬ, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;
Н.И. КУСКОВА, д-р техн. наук, профессор, зав. отделом, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
С.А. ХАЙНАЦКИЙ, науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА

Получены зависимости, определяющие фазовые и структурно-фазовые превращения вещества в процессе однородного нагрева цилиндрического проводника мощным импульсом тока. Рассчитаны электрофизические параметры синтеза разнообразных углеродных наноструктур, обеспечивающие выполнение энергетических и термодинамических условий структурно-фазовых превращений углерода. Проведены экспериментальные исследования электровзрывных процессов синтеза углеродных наноматериалов. Построены фазовые траектории углерода для разных режимов электровзрыва.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, углеродные наноматериалы, фазовые траектории углерода

Введение. Наноматериалы (НМ) как в дисперсном, так и в компактном виде, – это новое поколение материалов. Неослабевающий интерес ученых различных областей науки к углеродным наноматериалам обусловлен большим разнообразием физико-химических, оптических, механических и электрических свойств, проявляемых ими. Несмотря на значительное число работ в этой области [1-6], актуальными остаются проблемы эффективности целенаправленного синтеза углеродных наноматериалов (УНМ), получения материалов с заданными свойствами и новых НМ для применения в промышленности. Таким образом, актуальность работы определяется как научной, так и практической стороной.

Анализ предварительных исследований. Активные исследования взаимодействия импульсного тока с графитовыми проводниками ведется на протяжении последних десяти лет. Приоритет в разработке данной проблемы принадлежит исследователям из Института импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, Института металлофизики (ИМФ) НАН Украины и Института сильноточной электроники СО РАН. Одна из последних работ, опубликованных совместно [7] посвящена изучению фазовых превращений углерода в условиях экстремальных энергетических воздействий. Построена МГД- модель процесса взрыва проводника, проведены МГД-расчеты, которые показали, что при сжатии наполненных графитом медных трубок диаметром 2–4 нм импульсом тока возникают условия, необходимые для

синтеза алмазоподобных форм углерода. В работе [8] проанализированы структурно-энергетические аспекты синтеза углеродных наноматериалов, полученных при воздействии мощных импульсов тока.

Целью работы является определение энергетических и термодинамических условий синтеза углеродных наноматериалов в результате структурно-фазовых превращений углерода в высокоэнергетических импульсных процессах электрического взрыва графитовых проводников.

Структурно-фазовые превращения вещества в процессе электро-взрыва проводников. Для получения зависимостей, определяющих фазовые и структурно-фазовые превращения вещества в процессе однородного нагрева цилиндрического проводника мощным импульсом тока, используем систему уравнений, моделирующих процесс однородного нагрева проводника в электрической цепи с емкостью C и индуктивностью L [9-11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial r} - \frac{1}{2\mu r^2} \frac{\partial(r^2 B_\phi^2)}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{I^2 R}{mc}, \quad (3)$$

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{d(RI)}{dt} + \frac{1}{C} I = 0, \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \alpha(T - T_0)), \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + \beta(T - T_0)} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (6)$$

где ρ – плотность; t – время; v – скорость расширения; P – давление; $B_\phi = \mu I r / (2\pi a^2)$ – компонента магнитной индукции; μ – магнитная проницаемость; T – температура; T_0 – начальная температура; I – ток; m – масса проводника; R – сопротивление проводника; c – удельная теплоемкость; L – индуктивность контура; C – емкость конденсаторной батареи; σ – удельная электрическая проводимость; α – температурный коэффициент плотности; β – температурный коэффициент электропроводности; γ – показатель степени.

При начальных условиях $I(0) = 0$, $(dI/dt)|_{t=0} = U_0 / L$ для твердого проводника до момента начала плавления t_m (при условии $t_m \leq T/4$, где T – период) получаем следующее решение

$$I(t) \approx I_0 \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \exp\left(-\frac{R_0}{L}t\right) + I_0 \frac{t^5}{\sqrt{LC}} \cdot f(t), \quad (7)$$

где $f(t)$ – зависимость изменения сопротивления R от времени, R_0 – начальное сопротивление.

Как видно из приведенного решения (3.11), зависимость $I(t)$ отличается от временной зависимости тока в режиме КЗ, отличие членов ряда имеет место, начиная с пятого члена (t^5), с учетом этого получаем приближенное решение уравнений:

$$R(t) \approx R_0 \left[1 + \frac{R_0(\beta - \alpha)}{3mc} \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t^3 \left(1 - \frac{3R_0}{4L} t \right) \right], \quad (8)$$

$$\rho(t) = \frac{m}{\pi a^2(t)}, \quad (9)$$

$$a(t) \approx a_0 \left[1 + \frac{\alpha R_0}{6mc} \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t^3 \left(1 - \frac{3R_0}{4L} t \right) \right], \quad (10)$$

$$T(t) \approx T_0 + \frac{R_0}{3mc} \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t^3 \left(1 - \frac{3R_0}{4L} t \right), \quad (11)$$

$$P(r, t) \approx P_a + \mu \left(\frac{I(t)}{2\pi a(t)} \right)^2 \left(1 - \frac{r^2}{a^2(t)} \right) - \rho \frac{dv}{dt} (a(t) - r), \quad (12)$$

где a – радиус проводника; a_0 – начальный радиус проводника; $r = 0,75 a$; $P_a = P(a, t)$ – внешнее давление; U_0 – зарядное напряжение, l – длина проводника.

В выражении для магнитного давления (12) из-за существенно малого значения гидродинамического давления $\rho \frac{dv}{dt} (a(t) - r)$ данной величиной можно пренебречь. Тогда выражение (12) примет вид:

$$P(r, t) \approx P_a + \mu \left(\frac{I(t)}{2\pi a(t)} \right)^2 \left(1 - \frac{r^2}{a^2(t)} \right), \quad (13)$$

Используя полученные выражения (7)-(13), можно рассчитать параметры установки для заданного графитового проводника, необходимые для создания в веществе P , T -условий для фазовых или структурно-фазовых превращений углерода.

Время, необходимое для завершения процесса однородного плавления (при слабой зависимости температуры плавления от давления), $\tau_m \approx m\lambda_m / (I^2(t_m)R(t_m))$, где λ_m – удельная теплота плавления, Дж/кг.

Обозначим все величины в момент окончания плавления $t^0 = t_m + \tau_m$ следующим образом: $P^0, I^0, R^0, \rho^0, T_m, a^0$. Величина тока в момент t^0 :

$$I^0 \approx k_m I(t_m), \quad (14)$$

где $k_m = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R_1}{L} - \frac{1}{LC} \right) \tau_m^2$; $R_1 = (R^0 - R(t_m)) / \tau_m$.

Тогда магнитное давление при $t=t^0$

$$P^0 = \frac{\mu I^{02}}{(2\pi a^0)^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^{02}} \right) \approx k_m^2 P(t_m). \quad (15)$$

Приближенное решение, описывающее однородный нагрев жидкого проводника до температуры кипения T_b за время τ_f , имеет вид:

$$R(\tau) \approx R^0 + R_1 \tau; \quad (16)$$

$$I(\tau) \approx I^0 (1 + k\tau^2); \quad (17)$$

$$\rho(\tau) \approx \rho^0 (1 - 2q\tau); \quad (18)$$

$$T(\tau) \approx T^0 + A\tau; \quad (19)$$

$$P_f(r, \tau) = \left(\frac{\mu I^{02}}{(2\pi a)^2} + \frac{(qa^0 \rho^0)^2}{2} \right) \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right), \quad (20)$$

где $R_1 = AR^0[\beta + \alpha(\gamma - 1)]$; $\tau = t - t^0$; $q = 0,5\alpha A$; $k = -0,5(R_1/L + 1/LC)$.

При однородном нагреве жидкого проводника магнитное давление

$$P_f(T) \approx P^0 \approx \text{const}. \quad (21)$$

После нагрева проводника до температуры кипения поверхностный слой проводника начинает испаряться. Основную роль при испарении поверхности проводника начинает играть реактивное давление испарения, при котором плотность вещества в центре проводника может возрасти.

Оценим реактивное давление. Допустим, что испаряемый слой цилиндрического графитового проводника радиусом $a = 3$ мм и длиной $l = 15$ мм имеет толщину $\delta = 0,5$ мм. Тогда масса испаряемого слоя будет равна $m = \rho\pi[a^2 - (a - \delta)^2]l = 2,8 \cdot 10^{-4}$ кг. Чтобы испарить его потребуется энергия (при условии энергии сублимации $w_s = 20 \cdot 10^6$ Дж/кг) $w = w_s m \approx 5,6$ кДж. Кинетическую энергию такой величины слой будет иметь при максимальной скорости расширения паров $v = \sqrt{\frac{2w}{m}} \approx 6 \cdot 10^3$ м/с.

Оценим давление, которое возникло бы при торможении слоя неподвижной, абсолютно твердой мишенью за время 0,1 мкс. Ускорение слоя $dv/dt = 6 \cdot 10^{10}$ м²/с. Сила, сжимающая проводник, $F = m \frac{dv}{dt} \approx 10^7$ Н. Тогда реактивное давление испаряющегося слоя на поверхность проводника $P = F/S = F/2\pi al \approx 3,7 \cdot 10^{10}$ Па. Таким образом, полученное значение реактивного давления превышает величину давления в тройной точке графит -

жидкий углерод - алмаз.

Полученная временная зависимость температуры (11), описывающая нагрев твердого цилиндрического проводника, с учетом соотношения $m/R_0 = \sigma r \pi^2 a^4$ позволяет определить момент начала плавления или сублимации графита:

$$t_{m,s} \approx \left(\frac{\sigma r \pi^2 a^4 c L^2}{U_0^2} (T_{m,s} - T_0) \right)^{1/3}, \quad (22)$$

где $T_{m,s}$ – температура плавления или сублимации, К.

Будем выбирать режимы электровзрыва, при которых основная часть энергии выделяется в первой четверти периода тока, а именно, пусть плавление или сублимация графитового проводника происходят в момент времени

$$t_{m,s} \approx T/8 = 2\pi\sqrt{LC}/8 = \pi\sqrt{LC}/4.$$

Из выражений (11) и (12) можно найти отношение $(P - P_a)/(T - T_0) \approx P_{m,s}/T_{m,s}$ в момент фазового перехода на оси проводника:

$$\frac{P_{m,s}}{T_{m,s}} = \frac{\mu \sigma r c a_0^2}{\pi \sqrt{LC}}. \quad (23)$$

Выражение (23) для выбранного графитового проводника, имеющего радиус a_0 , определяет \sqrt{LC} для заданного значения отношения $T_{m,s}/P_{m,s}$ на кривых фазового равновесия графит→газ и графит→жидкость в центральной части проводника:

$$\sqrt{LC} = \mu \sigma r c a_0^2 \frac{T_{m,s}}{\pi P_{m,s}}. \quad (24)$$

Выбрав емкость конденсатора C , из выражения (24) находим индуктивность:

$$L = 0,1 \left(\mu \sigma r c a^2 \left(T_{m,s} / P_{m,s} \right) \right)^2 / C. \quad (25)$$

Использование выражения (22) в момент времени $t_{m,s} = \pi\sqrt{LC}/4$, а также значений L и C позволяет рассчитать необходимую величину зарядного напряжения:

$$U_0 = 8a^2 \left(\frac{\sigma r c T_{m,s} \sqrt{L}}{\pi \sqrt{C^3}} \right)^{1/2}. \quad (26)$$

Используя значение удельной энергии [14], необходимой для синтеза определенной аллотропной формы углерода, из выражения $w = CU_0^2/2m$ определяем значение длины графитового проводника:

$$l = \frac{CU_0^2}{2\pi r a^2 w}. \quad (27)$$

Задавая термодинамические величины – давление и температуру и варь-

ируя параметрами, которые входят в полученные выражения (25-27), можно целенаправленно управлять процессом электровзрыва. Влияя на процессы охлаждения и конденсации продуктов ЭВ путем выбора среды, можно получать частицы вещества в различных структурных состояниях (от аморфного до кристаллического) и новые ультрадисперсные материалы [7,13].

Экспериментальные исследования. Полученные выражения (25-27) позволили рассчитать для выбранных графитовых проводников режимы электровзрыва, в процессе которых давление вещества в центральной части проводника достигает заданного значения в момент фазового перехода.

При низкоэнергетических режимах нагрева проводника ($P < 10^7$ Па) могут происходить структурно-фазовые превращения графит→фуллерены. Получение алмаза при высокоэнергетических режимах электровзрыва связано с плавлением центральной части проводника и образованием жидкого углерода (при $P > 10^8$ Па) [12].

Расчет параметров электровзрыва проводили, задавая значения P на кривых фазового равновесия графит-газ (от $1,5 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^7$ Па) и графит-жидкость (от $2 \cdot 10^8$ до $1,5 \cdot 10^9$ Па) фазовой диаграммы углерода (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры электровзрыва графитовых проводников

P , Па	a , мм	m , 10^{-6} кг	C , мкФ	L , мкГн	U_0 , кВ	Режим ЭВП
$1,5 \cdot 10^9$	3	452	24	0,66	35	А5
$1,0 \cdot 10^9$	3	452	24	0,66	35	А6
$5,0 \cdot 10^8$	1	150	24	0,71	35	А4
$4,0 \cdot 10^8$	3	810	27	2,98	45	А3
$3,0 \cdot 10^8$	1	186	24	0,66	35	А1
$2,0 \cdot 10^7$	0,35	31,8	6	51,3	17	Ф3
$1,5 \cdot 10^7$	1	37,8	400	25,1	4,0	Ф5
$8,0 \cdot 10^6$	0,35	31,8	15	15,2	4,4	Ф2
$5,0 \cdot 10^6$	0,35	32	9	49,8	10	Ф4
$3,0 \cdot 10^6$	0,25	31,2	9	47,5	10	Ф1
$1,5 \cdot 10^6$	0,35	36	6	41,5	21	Ф6

Таким образом, были рассчитаны и реализованы высокоэнергетические режимы электровзрыва графитовых проводников A_i , при которых происходит плавление центральной части проводника и пробой поверхностного испарившегося слоя, а также низкоэнергетические режимы F_i , при которых происходят сублимация графитового проводника и пробой газа после паузы тока.

Диагностику электровзрыва проводников (ЭВП) осуществляли методом осциллографирования токов I и напряжений U . По полученным осциллограммам построены временные зависимости тока и напряжения. Характерные временные зависимости тока и напряжения в процессе ЭВП для режимов

с пробоем без паузы тока А1 и режима ЭВП с паузой тока Ф5 приведены на рис. 1,2.

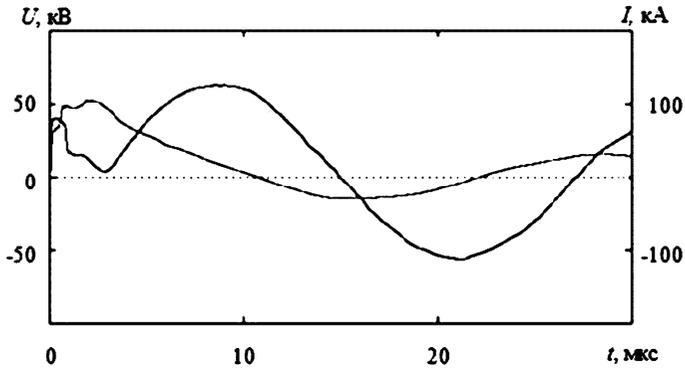


Рисунок 1 – Временные зависимости тока и напряжения для режима А1

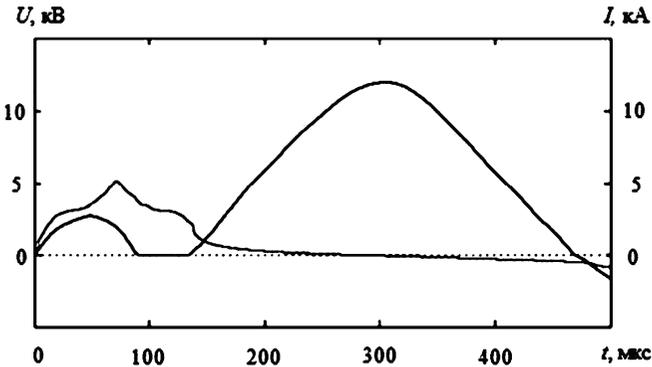


Рисунок 2 – Временные зависимости тока и напряжения для режима Ф5

Расчитаны максимальные ток I_{max} , скорость нарастания dl/dt и плотность тока j в графитовом проводнике, введенная удельная энергия w и скорость ее ввода dw_b/dt (см. табл. 2 и 3).

Фазовые траектории углерода в процессе электровзрыва. Полученные решения системы уравнений (1-6) для твердого (7-13) и жидкого проводников (16-20) позволили (после исключения времени из зависимостей $P(t)$ и $T(t)$) найти фазовые траектории вещества в процессе нагрева мощным импульсом тока (P, T - условия) до начала испарения проводника:

$$P(T) \approx \frac{k_m^2 \mu}{4\pi^2 a_0^2} \left(\frac{mcU_0(T - T_0)}{R_0 L} \right)^{2/3} \left(1 - \frac{r^2}{a_0^2} \right). \quad (28)$$

Таблица 2 – Параметры электровзрыва графитовых проводников с повторным пробоем без паузы тока

Режим ЭВП	I_{\max} , кА	dI/dt , 10^{10} А/с	j , 10^{10} А/м ²	w , МДж/кг	dw_p/dt , Дж/(кг·с)
A1	81,0	29,1	2,6	78	$1,43 \cdot 10^{13}$
A5	44,9	5,6	0,88	33	$2,2 \cdot 10^{12}$
A6	20,7	11,5	1,0	36	$1,1 \cdot 10^{12}$

Таблица 3 – Параметры электровзрыва графитовых проводников с повторным пробоем после паузы тока

Режим ЭВП	I_{\max} , кА	dI/dt , 10^8 А/с	j , 10^{10} А/м ²	w , МДж/кг	dw_p/dt , Дж/(кг·с)
Ф2	1,1	3,1	3,7	18,3	$7,4 \cdot 10^{11}$
Ф4	1,7	1,6	0,9	14,0	$3,0 \cdot 10^{11}$
Ф1	3,1	2,0	2,2	14,5	$1,3 \cdot 10^{12}$
Ф3	3,9	3,0	1,4	27,0	$1,1 \cdot 10^{12}$

Переход к удельным характеристикам вещества позволил получить следующее выражение для фазовых траекторий углерода, зависящих от электротехнических параметров и размеров проводника [15]:

$$P(T) = \frac{k_{m\mu}^2}{4} \left(\frac{\sigma_0 \rho_0 c_0 U_0 (T - T_0) a_0}{\pi L} \right)^{2/3} \left(1 - \frac{r^2}{a_0^2} \right). \quad (29)$$

На основании выражения (29) и данных (табл. 2 и 3), полученных в результате обработки осциллограмм, построены фазовые траектории углерода в центральной части проводника ($r = 0$) на диаграмме состояний для разных (см. табл. 1) режимов электровзрыва (рис. 3).

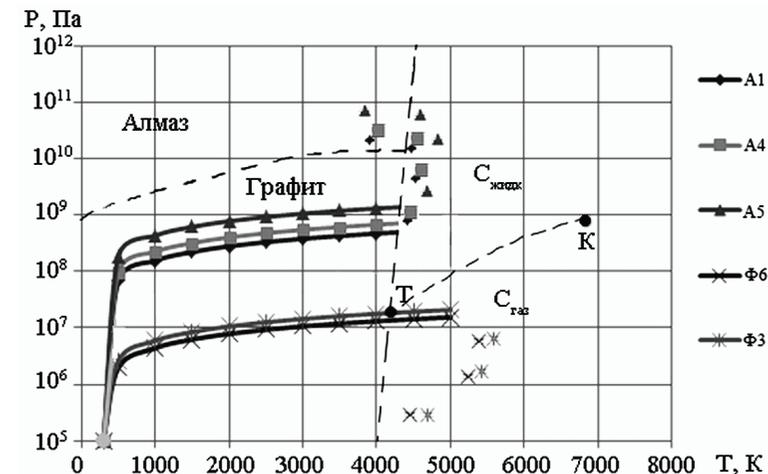


Рисунок 3 – Фазовые траектории углерода в центральной части проводника для разных режимов электровзрыва

Как видно из рис. 3, фазовые траектории различных режимов ЭВ, предполагающих синтез той или иной аллотропной формы углерода (алмаз, фуллерен) попадают в соответствующие им области фазовой диаграммы углерода, что подтверждает адекватность предложенной выше расчетной модели структурно-фазовых состояний углерода.

Выводы. На основе развития теории процессов взаимодействия мощного электроразрядного импульса тока с конденсированным веществом определены энергетические и термодинамические условия структурно-фазовых превращений углерода, в результате которых происходит синтез разнообразных углеродных наноструктур.

Впервые получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать электрофизические параметры, определяющие эволюцию состояния вещества, что позволяет управлять процессом электровзрыва графитовых проводников.

Исследованы электровзрывные процессы при скоростях нарастания тока от 10^8 до 10^{11} А/с и термодинамические условия получения различных углеродных наноматериалов. Построены фазовые траектории углерода для разных режимов электровзрыва.

Список литературы. 1. *Бобринецкий И. И.* Технология производства углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза из газовой фазы этанола / *И. И. Бобринецкий, В. К. Неволин, М. М. Симунин* // Химическая технология. – 2007. – №2. – С. 58–62. 2. *Булярский С. В.* Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение – Ульяновск: УлГУ, 2010. – 399 с. 3. *Булярский С. В.* Нуклеация кластеров катализаторов при росте углеродных нанотрубок / *С. В. Булярский* // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, вып. 11. – С. 64–70. 4. *Веремій Ю. П.* Утворення вуглецевих наноматеріалів в плазмі вторинного розряду / *Ю. П. Веремій, В. Я. Черняк, С. А. Філатов, Е. М. Штілевський, В. А. Зразжевський, С. К. Сафонов* // Укр. фіз. журн. – 2008. – Т. 33, № 4. – С. 395–399. 5. *Литовченко В. Г.* Модифіковані графеноподібні плівки як новий клас напівпровідників зі змінною шириною забороненої зони / *В. Г. Литовченко, М. В. Стріха, М. І. Ключі* // Український фізичний журнал. – 2011. – Т. 56, № 2. – С. 178–182. 6. *Иванова В. С.* От наноматериалов – к интеллектуальным нанотехнологиям / *В. С. Иванова, Г. Э. Фолманис* // Металлургия и машиностроение. – 2007. – № 1. – С. 2–10. 7. *Орешкин В. И.* Изучение фазовых превращений углерода в условиях экстремальных энергетических воздействий / *В. И. Орешкин, С. А. Чайковский, Н. А. Лабецкая, Ю. Ф. Иванов, К. В. Хищенко, П. Р. Леваинов, Н. И. Кускова, А. Д. Рудь* // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, вып. 2. – С.41–45. 8. *Рудь А. Д.* Структурно-энергетические аспекты синтеза углеродных наноматериалов высоковольтными электроразрядными методами / *А. Д. Рудь, Н. И. Кускова, Л. З. Богуславский, И. М. Кирьян, Г. М. Зелинская, Н. М. Белый* // Известия ВУЗОВ. Серия: Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56, вып. 7. – С. 99–104. 9. *Кускова Н. І.* Процеси взаємодії потужного електророзрядного імпульсу струму з конденсованою речовиною: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки» / *Н. І. Кускова*. – Київ, 2007. – 38 с. 10. *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. 11. *Кускова Н. І.* Исследование радиальной однородности жидкого расширяющегося проводника, нагреваемого импульсом тока / *Н. І. Кускова, С. І. Ткаченко* // Письма в журн. технич. физики. – 1996. – Т. 22, вып. 10. – С. 30–34. 12. *Кускова Н. І.* Фазовые превращения углерода в процессе нагрева мощным импульсом тока / *Н. І. Кускова* // Письма в журн. технич. физики. – 2005. – Т. 31, вып. 17. – С. 28–34. 13. *Кускова Н. І.* Фазовые

превращения углерода в условиях экстремальных энергетических воздействий / *Н. И. Кускова, А. Д. Рудь, В. И. Оreshkin* // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XVI Междунар. науч. конф., Николаев, 19–22 авг. 2013 г. – Николаев, 2013. – С. 95–98.

Bibliography (transliterated): 1. Bobrinetskiy I.I., Nevolin V.K., Simunin M.M. Tekhnologiya proizvodstva uglerodnykh nanotrubok metodom kataliticheskogo piroliza iz gazovoy fazy etanola. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2007, no. 2, pp. 58-62. Print. 2. Bulyarskiy S.V. Uglerodnye nanotrubki: tekhnologiya, upravleniye svoystvami, primeneniye. Ulyanovsk, UIGU Publ., 2010, 399 p. Print. 3. Bulyarskiy S.V. Nukleatsiya klasterov katalizatorov pri roste uglerodnykh nanotrubok. *ZhTF*, 2011, vol. 81, issue 11, pp. 64-70. Print. 4. Veremii Yu.P., Cherniak V.Ya., Filatov S.A., Shpilevskiy E.M., Zrazhevskiy V.A., Safonov Ye.K. Utvorenniya vuhletseyvykh nanomaterialiv v plazmi vtorynnoho rozryadu. *Ukr. fiz. zhurn.*, 2008, vol. 33, no. 4, pp. 395-399. Print. 5. Litovchenko V.G., Strikha M.V., Kliuy M.I. Modyfikovani hrafenopodibni plivky yak novyy klas napivprovodnykiv zi zminnoiu shyrynoiu zaboronenoï zony. *Ukr. fiz. zhurn.*, 2011, vol. 56, no. 2, pp. 178-182. Print. 6. Ivanova V.S., Folmanis G.E. Ot nanomaterialov – k intelektualnym nanotekhnologiyam. *Metallurgiya i mashinostroeniye*, 2007, no. 1, pp. 2-10. Print. 7. Oreshkin V.I., Chaykovskiy S.A., Labetskaya N.A., Ivanov Yu.F., Khishchenko K.V., Levashov P.R., Kuskova N.I., Rud A.D. Izucheniye fazovykh prevrashcheniy ugleroda v usloviyakh ekstremalnykh energeticheskikh vozddeystviy. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2012, vol. 82, issue 2, pp. 41-45. Print. 8. Rud A.D., Kuskova N.I., Boguslavskiy L.Z., Kiryan I.M., Zelinskaya G.M., Belyi N.M. Strukturno-energeticheskiye aspekty sinteza uglerodnykh nanomaterialov vysokovoltnymi elektrorazryadnymi metodami. *Izvestiya VUZOV. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2013, vol. 56, issue 7, pp.99-104. Print. 9. Kuskova N.I. Protsesy vzaiemodii potuzhnoho elektrorozriadnoho impulse strumu z kondensovanoiu rechovnoiu. *Avtoreferat Diss. Kyiv*, 2007. 38 p. Print. 10. Kuskova N.I., Tkachenko S.I. Teoretychne doslidzhennia dynamiky fazovykh peretvoren v rezultati mikrosekundnykh elektrychnykh vybukhiv provodnykiv tsylindrychnoi formy. *Ukrainskiy fizychnyi zhurnal*, 1999, vol. 44, no. 3, pp. 351-356. Print. 11. Kuskova N.I., Tkachenko S.I. Issledovaniye radialnoy odnorodnosti zhidkogo rasshiryayushchegosya provodnika, nagrevayemogo impulsom toka. *Pisma v zhurn. tekhnich. fiziki*, 1996, vol. 22, issue 10, pp. 30-34. Print. 12. Kuskova N.I. Fazovie prevrashcheniya ugleroda v protsesse nagreva moshchnim impulsom toka. *Pisma v zhurn. tekhnich. fiziki*, 2005, vol. 31, issue 17, pp. 28-34. Print. 13. Kuskova N.I., Rud A.D., Oreshkin V.I. Fazovyye prevrashcheniya ugleroda v usloviyakh ekstremalnykh energeticheskikh vozddeystviy. *Materialy XVI Mezhdunar. nauch. konf. «Fizika imulсных razryadov v kondensirovannikh sredakh (19.08-22.08.2013)»*. Nikolaev, 2013, pp. 95-98. Print.

Работа была выполнена в рамках конкурса совместных научных проектов НАН Украины и Сибирского Отделения РАН.

Поступила (received) 27.10.2014

М.И. БАРАНОВ, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ВЫБОР И УСТАНОВКА ЗАЩИТНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ РЕЗИСТОРОВ В ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Приведены результаты расчетной оценки числа защитных высоковольтных керамических постоянных резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей электрической энергии, используемых в различных отечественных и зарубежных электротехнологиях. Указаны полученные данные практической апробации предлагаемого подхода по выбору защитных керамических объемных постоянных резисторов в рассматриваемых электрических цепях высоковольтной импульсной техники.

Ключевые слова: высоковольтный емкостный накопитель энергии; зарядно-разрядная цепь; защитный резистор; расчетная оценка числа защитных резисторов.

Введение. В области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) широкое практическое применение нашли мощные емкостные накопители энергии (ЕНЭ), базирующиеся, как правило, на электрических малоиндуктивных конденсаторах [1–3]. При разработке и создании подобных ЕНЭ одной из важных прикладных электрофизических задач является та, которая связана с рациональным выбором числа защитных резисторов в зарядно-разрядных цепях применяемых высоковольтных конденсаторов. Как известно, подобные защитные резисторы необходимы для термомеханической защиты конденсаторов ЕНЭ от токовых перегрузок в аварийных режимах работы (например, при электрическом пробое секций одного из заряжаемых или разряжаемых конденсаторов батареи ЕНЭ) [4, 5]. При отсутствии данных защитных резисторов в зарядно-разрядных цепях высоковольтного ЕНЭ последствия действия в них токов короткого замыкания на его электрические конденсаторы и элементы могут быть катастрофическими (например, взрывное разрушение металлических или изоляционных корпусов конденсаторов; возгорание жидкого диэлектрика конденсаторов и окружающих конструкций; поражение обслуживающего персонала и используемого при испытаниях оборудования разлетающимися продуктами взрыва конденсаторов и элементами их токовой ошиновки). В этой связи вопросы термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов ЕНЭ при возможных аварийных режимах работы в их зарядно-разрядных цепях остаются актуальными прикладными научно-техническими задачами.

1. Постановка задачи исследования. Рассмотрим зарядно-разрядную цепь ЕНЭ, содержащую высоковольтные импульсные конденсаторы и за-

щитные резисторы, выполненные на основе высоковольтных керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60 [6,7]. Этот тип резисторов на номинальное постоянное напряжение ± 25 кВ обладает наибольшим значением рассеиваемой тепловой мощности по постоянному току, равным 60 Вт. Принимаем, что указанные защитные резисторы жестко установлены на высоковольтных выводах конденсаторов ЕНЭ. Данные выводы на изоляционных (металлических) крышках импульсных конденсаторов, как правило, имеют разнесенную в пространстве цилиндрическую или коаксиальную конструкцию, обеспечивающую их (высоковольтных выводов) электрическую прочность. Такое размещение защитных резисторов позволяет минимизировать габаритные размеры защитных устройств ЕНЭ и конструкционно выполнить их наиболее технологичным путем, а также снизить их паразитное влияние на протекающие в разрядной цепи ЕНЭ с электрической нагрузкой электромагнитные процессы. Считаем, что суммарное активное сопротивление низкоомной (высокоомной) разрядной цепи мощного ЕНЭ с учетом влияния защитных керамических резисторов оказывается равным R_p . Требуется разработать инженерно-технический подход по приближенному выбору числа защитных высоковольтных керамических резисторов с их номинальным значением активного сопротивления R_0 в зарядно-разрядных цепях таких мощных ЕНЭ.

2. Приближенный расчет минимального числа защитных резисторов в зарядно-разрядной цепи ЕНЭ. Минимальное число N_m рассматриваемых защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядной цепи ЕНЭ может быть найдено из следующего приближенного соотношения:

$$N_m = W_{ЕНЭ} / W_k, \quad (1)$$

где $W_{ЕНЭ}$ – номинальное значение электрической энергии, запасаемой в импульсных конденсаторах ЕНЭ; W_k – критическое (максимальное) значение тепловой энергии, рассеиваемой одним защитным резистором в цепи ЕНЭ.

Согласно экспериментальным данным, полученным в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» с участием автора и приведенным в [7], критическое значение рассеиваемой тепловой энергии W_k для высоковольтных керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60-24 Ом составляет примерно 2,5 кДж. Следует заметить, что именно данный тип высоковольтных керамических резисторов ТВО-60 ($R_0 = 24$ Ом) находит наиболее широкое практическое применение в качестве защитных резисторов ЕНЭ. Опытные данные показывают, что в случае применения в качестве защитных резисторов зарядно-разрядных цепей мощных ЕНЭ керамических сопротивлений типа ТВО-60 других номиналов (например, с $R_0 = 100$ Ом) для них в первом приближении также можно использовать соотношение $W_k \approx 2,5$ кДж. Поэтому априори зная величины $W_{ЕНЭ}$ и W_k , с помощью расчетного соотношения (1) электрофизик-пользователь может сравнительно легко определить в прибли-

женном виде минимальное число N_m защитных высоковольтных керамических резисторов, устанавливаемых в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ. На практике при выборе реального числа $N_p \geq N_m$ защитных высоковольтных резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных ЕНЭ требуется учитывать влияние требований разработчика ВИТ к активному сопротивлению R_p цепи разряда ЕНЭ.

3. Приближенный расчет реального числа защитных резисторов в зарядно-разрядной цепи ЕНЭ. Выполним оценку реального числа N_p защитных резисторов в зарядно-разрядной цепи ЕНЭ, учитывающую технические требования разработчика, предъявляемые при создании мощного ЕНЭ к значению активного сопротивления R_p разрядной цепи ЕНЭ. С этой целью введем понятие расчетного значения активного сопротивления R_{p0} , вносимого защитными резисторами в цепь разряда ЕНЭ. Так как токовую ошиновку разрядной цепи ЕНЭ практически всегда стремятся выполнять с минимальным значением активного сопротивления (для обеспечения минимальных диссипативных потерь энергии, накопленной конденсаторами ЕНЭ), то для низкоомной разрядной цепи ЕНЭ можно положить, что $R_{p0} \approx R_p$. Для случая высокоомной разрядной цепи мощного ЕНЭ ($R_p \gg R_{p0}$) и отсутствия требований по влиянию защитных резисторов на значение ее активного сопротивления величина $N_p > N_m$ будет определяться числом конденсаторов в батарее ЕНЭ. Для расчетного определения величины R_{p0} воспользуемся соотношением вида:

$$R_{p0} = R_0 / (n_p m_c), \quad (2)$$

где n_p – число параллельно включенных защитных резисторов на высоковольтном выводе одного из импульсных конденсаторов ЕНЭ; m_c – число параллельно включенных импульсных конденсаторов батареи мощного ЕНЭ.

Тогда, исходя из (2), для реального числа N_p защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ находим:

$$N_p = R_0 / R_{p0} = n_p m_c. \quad (3)$$

Из (3) и используемого нами приближенного соотношения $R_{p0} \approx R_p$ следует, что при заданных исходных значениях величин номиналов активных сопротивлений R_0 для выбранного типа защитного керамического резистора и суммарного активного сопротивления R_p низкоомной разрядной цепи ЕНЭ искомое выражение для определения реального числа (в этом случае $N_p > N_m$) защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядной цепи рассматриваемого ЕНЭ приобретает следующий вид:

$$N_p \approx R_0 / R_p \approx n_p m_c. \quad (4)$$

Кроме того, из (4) с учетом (2) и принятого соотношения $R_{p0} \approx R_p$ для расчетной оценки активного сопротивления R_p низкоомной высоковольтной разрядной цепи мощного ЕНЭ получаем следующее расчетное выражение:

$$R_p \approx R_0 / (n_p m_c). \quad (5)$$

4. Результаты практической апробации предлагаемого подхода к выбору защитных резисторов в зарядно-разрядной цепи ЕНЭ. Приведен-

ный выше инженерный расчет схемной реализации защитных высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ прошел соответствующую практическую проверку на натуральных образцах мощных высоковольтных ЕНЭ разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ».

На рис. 1 и 2 приведены фрагменты зарядно-разрядных цепей мощных ЕНЭ с жестко установленными на высоковольтных выводах их конденсаторов защитными керамическими резисторами типа ТВО-60 номиналом R_0 соответственно 24 и 100 Ом. Следует отметить, что разрядные цепи показанных на рис. 1 и 2 фрагментов мощных высоковольтных ЕНЭ характеризуются совершенно различными значениями своих активных сопротивлений R_p . Так, изображенная на рис. 1 разрядная цепь мощного генератора импульсной компоненты тока искусственной молнии (ГИТ-А) характеризуется активным сопротивлением около $R_{pA} = 0,057$ Ом [5], а приведенная на рис. 2 разрядная цепь мощного генератора длительной компоненты тока искусственной молнии (ГИТ-С) – активным сопротивлением около $R_{pC} = 4,74$ Ом [4,5].



Рисунок 1 – Внешний вид фрагмента зарядно-разрядных цепей мощного ЕНЭ на 50 кВ и запасаемую электрическую энергию $W_{ЕНЭ} = 420$ кДж с высоковольтными импульсными конденсаторами типа ИК-50-3 и жестко установленными на их высоковольтных выводах защитными керамическими резисторами типа ТВО-60-24 Ом [4]

Использование предлагаемого автором расчетного соотношения (1) применительно к зарядно-разрядной цепи мощного высоковольтного генератора ГИТ-А (см. рис. 1) показывает, что при $W_{ЕНЭ} = 420$ кДж [4] и $W_k = 2,5$ кДж [7] минимальное число N_m защитных керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом в ней (этой электрической цепи) должно составлять примерно 168 шт. С учетом того, что низкоомная разрядная цепь генератора ГИТ-А должна иметь активное сопротивление $R_{pA} = 0,057$ Ом [5] из (4) находим, что в этом случае ($R_0 = 24$ Ом; $m_C = 111$ шт. [8]) реальное число N_p защитных высоковольтных керамических резисторов в разрядной цепи рассматриваемого мощного ЕНЭ должно составлять примерно 421 шт. Видно,

что для рассматриваемого нами мощного ЕНЭ выполняется расчетное неравенство вида $N_p > N_m$. Учитывая технологическую возможность практической реализации конструкции защитного блока керамических резисторов на высоковольтном выводе одного из конденсаторов типа ИК-50-3, приходим к выводу о том, что в данном электрофизическом случае требуется принять параметр n_p (число резисторов на выводе одного конденсатора), равный 4 шт. Тогда для защитных высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом в зарядно-разрядной цепи генератора ГИТ-А окончательно принимаем, что $N_p = n_p m_C = 444$ шт.



Рисунок 2 – Внешний вид фрагмента зарядно-разрядных цепей мощного ЕНЭ на 5 кВ и запасаемую электрическую энергию $W_{ЕНЭ} = 567$ кДж с высоковольтными импульсными конденсаторами типа ИМ-5-140 и жестко установленными на их высоковольтных выводах защитными керамическими резисторами типа ТВО-60-100 Ом [4]

Полученный нами на основе предложенного подхода расчетный результат для числа $N_p = 444$ шт. защитных керамических резисторов в зарядно-разрядной цепи мощного высоковольтного генератора ГИТ-А полностью соответствует принятому сотрудниками НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» схемному решению для защитных устройств на конденсаторах данного ЕНЭ, используемого при формировании импульсной компоненты тока искусственной молнии с нормированными амплитудно-временными параметрами [4,5,8,9].

Применив далее расчетное выражение (5), находим, что для рассматриваемого мощного высоковольтного генератора ГИТ-А ($R_0 = 24$ Ом; $n_p = 4$ шт.; $m_C = 111$ шт. [4,8]) оценочная величина собственного активного сопротивления R_{pA} его силовоточной разрядной цепи должна составлять численное зна-

чение, примерно равное 0,054 Ом. Как видим, это расчетное значение активного сопротивления R_{pA} весьма близко к его опытному значению, полученному на основании расшифровки ряда осциллограмм разрядного тока низкоомного генератора ГИТ-А для импульсной компоненты тока искусственной молнии в режиме его колебательного разряда на низкоомную активно-индуктивную нагрузку и составляющему около 0,057 Ом [5,8]. Незначительное возрастание в данном случае опытного значения активного сопротивления R_{pA} по сравнению с его расчетным значением связано с внесением в сильноточную разрядную цепь низкоомного генератора ГИТ-А дополнительного активного сопротивления от токопроводов ее ошиновки. Указанные результаты для активного сопротивления R_{pA} сильноточной разрядной цепи натурного образца мощного высоковольтного ЕНЭ свидетельствуют о том, что расчетное соотношение (5) можно использовать при практических оценках величины активного сопротивления разрядной цепи низкоомного ЕНЭ.

Что касается расчетной оценки числа защитных керамических резисторов типа ТВО-60-100 Ом в зарядно-разрядной цепи генератора ГИТ-С (см. рис. 2), то согласно (1) при $W_{ЕНЭ} = 567$ кДж [4] и $W_k = 2,5$ кДж [7] величина N_m для его конденсаторов ($m_C = 324$ шт. [4,8]) окажется примерно равной 227 шт. Учитывая то электрофизическое обстоятельство, что каждый высоковольтный импульсный конденсатор данного мощного генератора импульсных токов должен быть защищен от сверхвысоких термомеханических нагрузок, возникающих внутри его металлического корпуса в аварийных режимах работы батареи его ЕНЭ и протекании при этих случаях в ее (этой конденсаторной батарее) электрических цепях опасных сверхтоков (токов короткого замыкания), то реальное число N_p защитных резисторов указанного типа в зарядно-разрядных цепях генератора ГИТ-С в соответствии с выражением (4) при $n_p = 1$ шт. должно быть равным 324 шт. Видно, что и для данного мощного ЕНЭ выполняется неравенство вида $N_p > N_m$. Активное сопротивление R_{p0} , вносимое в этом случае используемыми защитными керамическими резисторами ($R_0 = 100$ Ом; $n_p = 1$ шт.; $m_C = 324$ шт. [4,8]) в высокоомную разрядную цепь рассматриваемого высоковольтного генератора, согласно (2) составит около 0,31 Ом. Это значение сопротивления будет существенно меньше полного активного сопротивления его разрядной цепи, равного $R_{pC} = 4,74$ Ом [4].

Выводы

1. Приведенные расчетно-экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при выборе защитных высоковольтных резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных ЕНЭ специалистам необходимо пользоваться следующим *правилом*: накопленная электрическая энергия $W_{ЕНЭ}$ в импульсных конденсаторах ЕНЭ в случае его аварийных режимов работы (например, при электрическом пробое секций одного из конденсаторов) должна поглощаться защитными резисторами, установленными в зарядно-разрядных цепях ЕНЭ.

2. Показано, что в качестве защитных резисторов в высоковольтных зарядно-разрядных цепях мощных ЕНЭ могут быть использованы промышленно выпускаемые высоковольтные керамические объемные постоянные резисторы типа ТВО-60, жестко размещенные прямо на высоковольтных металлических выводах импульсных конденсаторов рассмотренных нами ЕНЭ.

3. Сформулированное выше *правило* позволило разработать инженерно-технический подход по приближенному расчету минимального N_m и реального $N_p \geq N_m$ числа защитных высоковольтных керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60 в зарядно-разрядных цепях мощных ЕНЭ, учитывающий технические требования, предъявляемые разработчиком ВИТ к активному сопротивлению R_p низкоомной сильноточной цепи разряда ЕНЭ. При отсутствии указанных требований к активному сопротивлению R_p высокоомной цепи колебательного или аperiodического разряда мощного ЕНЭ на практике следует пользоваться приближенным соотношением $N_p = n_p m_c$.

4. Опытные результаты, полученные в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» при эксплуатации мощных высоковольтных ЕНЭ (генераторов импульсного тока), свидетельствуют о том, что в их зарядно-разрядных цепях в качестве защитных высоковольтных керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60 могут применяться резисторы номиналом R_0 от 24 до 100 Ом.

5. Экспериментальная апробация предложенного подхода и полученных приближенных расчетных соотношений (1), (4) и (5) по выбору защитных резисторов в высоковольтных зарядно-разрядных электрических схемах мощных ЕНЭ с низкоомными (высокоомными) сильноточными разрядными цепями на натуральных образцах мощных высоковольтных ЕНЭ разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» подтвердила их работоспособность и достоверность.

Список литературы: 1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 2. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 3. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с. 4. Баранов М.И., Колушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81-85. 5. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: «Точка», 2014. – 400 с. 6. ГОСТ 11324-76. Резисторы постоянные объемные типа ТВО. – М.: Изд-во Госстандарта СССР, 1976. – 20 с. 7. Баранов М.И., Бочаров В.А., Носенко М.А. Предельные характеристики по рассеиваемой импульсной мощности и энергии высоковольтных керамических объемных резисторов типа ТВО-60 // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ», 2007. – № 20. – С. 45-56. 8. Баранов М.И., Колушко Г.М., Лысенко В.О. Экспериментальное определение активного сопротивления и электропроводности сильноточного плазменного канала в разрядной цепи генератора импульсной компоненты тока искусственной молнии // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 3. – С. 51-55. 9. Баранов М.И., Кравченко В.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему действию импульсного тока молнии // Электричество. – 2013. – № 10. – С. 7-15.

Bibliography (transliterated): 1. Tehnika bol'shikh impul'snyh tokov i magnitnyh polej. Pod red. V.S.

Komel'kova. Moscow: Atomizdat, 1970. 472 s. Print. **2.** Gulyj G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij. Kiev: Naukova dumka, 1990. 208 s. Print. **3.** Baranov M.I. Izbrannye voprosy jelektrofiziki. Tom 2, Kn. 1: Teorija jelektrofizicheskikh jeffektov i zadach. Khar'kiv: NTU «HPI», 2009.– 384 s. Print. **4.** Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja naturnyh ispytanij tehniceskikh ob#ektov. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2008. №3. S.81–85. Print. **5.** Baranov M.I. Izbrannye voprosy jelektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika jelektrofizicheskikh zadach. Khar'kiv: «Tochka», 2014. 400 s. Print. **6.** GOST 11324-76. Rezistory postojannye ob#emnye tipa TVO. Moscow: Izd-vo Gosstandarta SSSR, 1976. 20 s. Print. **7.** Baranov M.I., Bocharov V.A., Nosenko M.A. Predel'nye harakteristiki po rassei-vaemoj impul'snoj moshhnosti i jenerгии vysokovol'tnyh keramicheskikh ob#emnyh rezistorov tipa TVO-60. Visnik NTU «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Tehni-ka ta jelektrofizika visokih naprug». Khar'kiv: NTU «HPI», 2007. № 20. S.45–56. Print. **8.** Baranov M.I., Koliushko G.M., Lysenko V.O. Jeksperimental'noe opredelenie aktivnogo soprotivlenija i jelektroprovodnosti sil'notochnogo plazmennogo kanala v razrjadnoj cepi generatora impul'snoj komponenty toka iskusstvennoj molnii. Elektrotehnika i elektromehanika. 2011. №3. S.51–55. Print. **9.** Baranov M.I., Kravchenko V.I. Jelektrotermicheskaja stojkost' provodov i kabelej letatel'nogo apparata k porazhajushhemu dejstvuju impul'snogo toka molnii. Jelektritchestvo. 2013. №10. S.7–15. Print.

Поступила (received) 01.09.2014

УДК 621.3.022: 621.7.044.7

М.И. БАРАНОВ, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ЗАРЯДНО–РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ОТ АВАРИЙНЫХ СВЕРХТОКОВ

Приведены результаты расчетной оценки ограничений установленными в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) защитными высоковольтными керамическими резисторами амплитуд аварийного сверхтока, давления и температуры в локальной зоне внутреннего электрического пробоя маслonaполненного высоковольтного импульсного конденсатора указанных цепей ЕНЭ и развития в его жидком диэлектрике сильноточного плазменного канала искрового разряда.

Ключевые слова: мощный емкостный накопитель энергии; высоковольтный конденсатор; защитный резистор; оценка ограничений тока, давления и температуры.

Введение. Практика эксплуатации мощных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), зарядно-разрядные цепи которых содержат высоковольтные импульсные конденсаторы с металлическими или изоляционными корпусами, указывает на необходимость выполнения термомеханической защиты конденсаторов ЕНЭ от аварийных сверхтоков (токов короткого замыкания

© М.И. Баранов, 2014

при электрическом пробое конденсаторов на стадии их заряда или разряда) [1-3]. Отсутствие подобной защиты может приводить к катастрофическим последствиям действия аварийных сверхтоков на пробитые электрическим сильноточным разрядом конденсаторы ЕНЭ: взрывному разрушению металлических (изоляционных) корпусов конденсаторов; возгоранию жидкого диэлектрика конденсаторов и окружающих поврежденные конденсаторы конструкций; травматическому поражению обслуживающего персонала и выходу из строя используемого при исследованиях дорогостоящего электрофизического оборудования из-за воздействия на них разлетающихся продуктов взрыва конденсаторов и элементов их токовой ошиновки. Одним из возможных вариантов практической реализации термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощных ЕНЭ является жесткая установка на их высоковольтных металлических выводах защитных керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60 [4,5]. До сих пор слабо исследованными вопросами в области высоковольтной импульсной техники (ВИТ) остаются те, которые связаны с особенностями рассматриваемой термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощных ЕНЭ, проливающимися свет на показатели ограничения ею (этой защитой) аварийного сверхтока, гидродинамического давления и температуры в зоне внутреннего электрического пробоя высоковольтных маслонаполненных конденсаторов мощных ЕНЭ и соответственно на показатели термомеханической стойкости указанных конденсаторов. Поэтому данные вопросы термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощных ЕНЭ остаются актуальными прикладными научно-техническими задачами в области ВИТ.

1. Постановка задачи электрофизического исследования. Рассмотрим зарядно-разрядную цепь мощного ЕНЭ, содержащего параллельно включенные высоковольтные импульсные конденсаторы C в количестве m_C шт. (рис. 1).

Считаем, что в качестве защитных резисторов в рассматриваемой зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ используются высоковольтные керамические резисторы типа ТВО-60 [4,5]. Пусть данные резисторы номиналом R_0 установлены на высоковольтных выводах защищаемых от аварийных сверхтоков маслонаполненных импульсных конденсаторов электрической емкостью C . Причем, при числе n_p параллельно включенных защитных резисторов на каждом высоковольтном выводе конденсатора защитное сопротивление R_3 согласно схеме на рис. 1 будет определяться выражением R_0/n_p . Принимаем, что при заряде до напряжения $U_3 = U_0 \leq 50$ кВ или разряде заряженных высоковольтных конденсаторов емкостью C общим числом m_C мощного ЕНЭ возможно наступление его аварийного режима работы, обусловленного к примеру внутренним электрическим пробоем секций одного из конденсаторов рассматриваемого нами ЕНЭ. Требуется разработать научно-технический подход по приближенной расчетной оценке ограничения установленными в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ защитными высоко-

вольтными керамическими резисторами аварийного сверхтока (тока короткого замыкания), гидродинамического давления и температуры в локальной области электрического пробоя маслонаполненного конденсатора такого ЕНЭ.

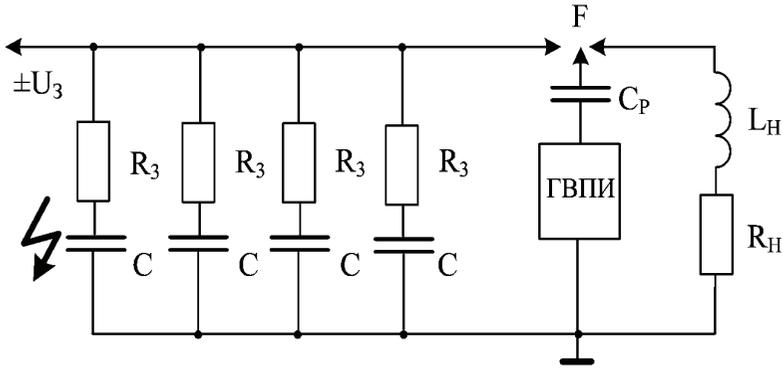


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема мощного ЕНЭ в аварийном режиме работы, вызванном электрическим пробоем одного из его высоковольтных маслонаполненных конденсаторов на напряжение U_0 ($U_3 = U_0 \leq 50$ кВ – зарядное напряжение параллельно включенных числом m_C конденсаторов емкостью C ; R_3 – защитное сопротивление, собранное из высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 номиналом R_0 ; F – управляемый высоковольтный коммутатор [5]; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих импульсов на напряжение ± 100 кВ [5]; C_p – высоковольтный разделительный конденсатор емкостью 180 пФ на напряжение ± 120 кВ [5]; R_H, L_H – активное сопротивление и индуктивность нагрузки)

2. Приближенный расчет ограничения защитными резисторами аварийного сверхтока в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ. В аварийном режиме работы мощного ЕНЭ (например, в случае пробоя одного из его заряженных конденсаторов), каждый из высоковольтных конденсаторов которого снабжен защитными резисторами с суммарным активным сопротивлением $R_3 = R_0/n_p$, для расчетной оценки амплитуды I_{mp} протекающего в апериодическом режиме ($R_0/n_p > 2[L_p/(m_C - 1)C]^{1/2}$ [6], где L_p – собственная индуктивность ошиновки ЕНЭ) через пораженный электрическим разрядом конденсатор сверхтока можно воспользоваться следующим выражением:

$$I_{mp} = U_0 [R_0/n_p(m_C - 1) + R_0/n_p]^{-1}. \quad (1)$$

Из (1) при $m_C \gg n_p$, что для мощных высоковольтных ЕНЭ выполняется практически всегда, для расчетного определения в рассматриваемом случае величины амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока получаем соотношение:

$$I_{mp} = U_0 n_p/R_0. \quad (2)$$

Так как для используемой нами схемы термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ ($U_0 \leq 50$ кВ; $m_C \gg n_p$) величина

параметра $n_p \leq 4$ шт., а номинал активного сопротивления R_0 защитных высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 практически изменяется в диапазоне $24 \text{ Ом} \leq R_0 \leq 100 \text{ Ом}$, то из (2) следует, что при применении в мощном ЕНЭ защитных высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 указанного номинала R_0 амплитуда I_{mp} аварийного сверхтока в случае внутреннего электрического пробоя секций одного из его конденсаторов не будет превышать численного значения 10 кА. Такая величина амплитуды I_{mp} импульсного разрядного тока для высоковольтных импульсных конденсаторов, обычно используемых в мощных ЕНЭ, с позиций их термомеханической стойкости, как известно, является безопасной для них величиной [1,7].

3. Приближенный расчет ограничения защитными резисторами давления внутри пробитого конденсатора зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ. Амплитуда давления P_m , возникающего внутри металлического или изоляционного корпуса пораженного внутренним сильноточным электрическим разрядом высоковольтного маслонеполненного конденсатора мощного ЕНЭ, может быть приближенно найдена из следующего выражения [5]:

$$P_m = \mu_0 I_{mp}^2 / (4\pi^2 r_m^2), \quad (3)$$

где $r_m \approx 0,024(I_{mp})^{1/3}(t_m)^{1/2}$ – максимальное значение радиуса канала сильноточного электрического разряда в жидком диэлектрике пробитого высоковольтного конденсатора ЕНЭ [8,9]; t_m – время, соответствующее амплитуде I_{mp} аварийного сверхтока, протекающего через пораженный искровым разрядом конденсатор ЕНЭ; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [10].

Заметим, что при получении приближенного расчетного соотношения (3) были использованы условие несжимаемости жидкого диэлектрика (например, минерального масла) высоковольтного конденсатора ЕНЭ и следствия, вытекающие из закона Паскаля [10]. Из (3) видно, что имеющее место в используемом способе термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ согласно (2) ограничение защитными резисторами амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока обеспечивает соответственно и ограничение возникающего внутри корпуса его электрически пробитого конденсатора гидродинамического давления в рассматриваемом аварийном режиме работы ЕНЭ.

4. Приближенный расчет ограничения защитными резисторами температуры внутри пробитого конденсатора зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ. Максимальное значение термодинамической температуры T_m (с размерностью в градусах Кельвина) в зоне электрического пробоя секций маслонеполненного конденсатора ЕНЭ с алюминиевыми обкладками и соответственно приэлектродным падением напряжения в разрядном промежутке не более 10 В определим из следующего приближенного соотношения [5,9]:

$$T_m = 11,49 \sqrt[4]{I_{mp}^{1/3} / (\sigma_c t_m)}, \quad (4)$$

где $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)^{-1}$ – постоянная Стефана-Больцмана [10].

Из (4) вытекает то положение, что ограничение по (2) защитными резисторами амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока в пораженном сильноточным искровым разрядом конденсаторе мощного ЕНЭ вызывает соответственно и ограничение температуры в локальной зоне его внутреннего электрического пробоя, что положительно сказывается на показателях термомеханической стойкости маслонаполненных высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ.

5. Взрывообразное разрушение защитных резисторов и прерывание аварийного сверхтока в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ. В аварийном режиме работы рассматриваемого ЕНЭ на стадии заряда (чаще всего) или разряда его высоковольтных конденсаторов (например, в случае электрического пробоя внутренней изоляции одного из конденсаторов ЕНЭ) может возникать высокоскоростное разрушение защитных керамических резисторов R_3 типа ТВО-60, сопровождающееся взрывообразным разлетом раздробленных на мелкие части таких их составных элементов как наружной массивной фарфоровой оболочки и внутреннего малогабаритного графитового стержня. Подобное явление наступает тогда, когда выделяемая в защитном резисторе тепловая энергия W_p существенно превышает критическое значение W_k тепловой энергии, многократно рассеиваемой одним защитным резистором в разрядной цепи мощного ЕНЭ [4]. При этом взрывообразное разрушение защитного керамического резистора будет выполнять роль высокоскоростного размыкателя аварийной цепи, способствующего защите пробитого конденсатора от механического разрушения. Согласно [4] численное значение величины W_k для высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60 составляет около 2,5 кДж. Определение значения W_p требует знания времени t_B , при котором может происходить по сути электрический взрыв защитного резистора, и амплитудно-временных параметров аварийного тока. С учетом затруднений, возникающих при нахождении параметра t_B , ограничимся определением величины W_p на участке $[0, \tau_{И}]$ протекания в зарядно-разрядной цепи генератора ГИТ-А с мощным ЕНЭ [4,5,11], предназначенным для формирования тока искусственной молнии на низкоомной активно-индуктивной нагрузке, аварийного аperiodического импульса тока длительностью $\tau_{И}$ на уровне 0,5 I_{mp} по защитному резистору типа ТВО-60-24 Ом. Расчет для данного случая ($U_0 = 50 \text{ кВ}$; $R_0 = 24 \text{ Ом}$; $n_p = 4 \text{ шт.}$; $m_C = 111 \text{ шт.}$; $I_{mp} = 8,4 \text{ кА}$; $t_m = 3,3 \text{ мкс}$; $\tau_{И} = 0,76 \text{ мс}$) величины W_p с учетом соотношений из [5] показывает, что при этом интеграл действия J_{dA} аварийного тока для указанного резистора принимает численное значение около $2,21 \cdot 10^3 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$. Тогда тепловая энергия, выделяющаяся на указанном временном участке в защитном резисторе, составит примерно $R_0 \cdot J_{dA} = 53 \text{ кДж}$. Приведенные оценочные расчетные данные показывают, что при используемых в зарядно-разрядной

цепи генератора ГИТ-А защитных резисторах типа ТВО-60-24 Ом и исходных параметрах аварийного тока при $t_B \gg t_m$ будет наблюдаться взрывообразное разрушение керамических резисторов, установленных на выводе пораженного конденсатора типа ИК-50-3 [5,11]. Отметим, что вопросы взрывообразного разрушения резисторов типа ТВО-60 в мощных ЕНЭ требуют своего дальнейшего исследования.

6. Результаты апробации предложенных расчетных оценок основных показателей термомеханической защиты конденсаторов мощного ЕНЭ на основе применения защитных резисторов. Полученные расчетные соотношения (2)–(4) были апробированы на зарядно-разрядной цепи действующего натурного образца мощного ЕНЭ, используемого в качестве генератора импульсной А- компоненты тока искусственной молнии (генератора импульсного тока ГИТ-А) [11]. Данный генератор на номинальные значения зарядного напряжения $U_0 = 50$ кВ и запасаемой электрической энергии $W_{ЕНЭ} = 420$ кДж в своей сильнооточной низкоомной разрядной цепи имеет собственное активное сопротивление $R_p \approx 0,057$ Ом и собственную индуктивность $L_p \approx 2,5$ мкГн [5,11]. Генератор ГИТ-А содержит параллельно включенные высоковольтные импульсные конденсаторы типа ИК-50-3 ($C = 3$ мкФ; $m_C = 111$ шт. [5]) с установленными на их потенциальных металлических выводах защитными высоковольтными керамическими резисторами типа ТВО-60-24 Ом ($R_0 = 24$ Ом; $n_p = 4$ шт. [5, 11]). Численная оценка по (2) амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока (тока короткого замыкания при электрическом пробое одного из конденсаторов ЕНЭ) в аperiодическом режиме разряда заряженных конденсаторов ЕНЭ в количестве $(m_C - 1) = 110$ шт. на один пробитый конденсатор ЕНЭ применительно к генератору ГИТ-А ($U_0 = 50$ кВ; $L_p \approx 2,5$ мкГн; $R_0 = 24$ Ом; $n_p = 4$ шт.; $m_C = 111$ шт. [5, 11]) показывает, что она не превышает 8,4 кА. Расчетная оценка согласно [6] временного параметра разрядного тока t_m и радиуса плазменного канала r_m по (3) применительно к рассматриваемому аварийному режиму работы генератора ГИТ-А приводит нас к тому, что $t_m = 3,3$ мкс и $r_m = 1,4$ мм. Тогда в соответствии с (3) амплитуда P_m гидродинамического давления внутри пробитого маслонеполненного конденсатора типа ИК-50-3 численно составит около $11,5 \cdot 10^5$ Па (11,3 атм). При этом максимальная термодинамическая температура T_m в локальной зоне внутреннего электрического пробоя высоковольтного конденсатора типа ИК-50-3 согласно (4) будет примерно равной $37,1 \cdot 10^3$ К, что хорошо согласуется с известными расчетно-экспериментальными данными для температуры низкотемпературной плазмы сильнооточных каналов искровых разрядов в конденсированных средах [2,9].

Важно отметить то одно обстоятельство, что при отсутствии в зарядно-разрядных цепях мощного высоковольтного генератора ГИТ-А защитных высоковольтных керамических резисторов амплитуда аварийного сверхтока для слабозатухающего колебательного режима разряда его конденсаторов в

количестве $(m_C - 1) = 110$ шт. на один электрически пробитый высоковольтный конденсатор типа ИК-50-3 при численном значении по [12,13] нормирующего коэффициента $\beta_A \approx 1,59$ для кривой изменения разрядного тока в нашем случае окажется примерно равной [6]:
$$I_{mp} \approx U_0 \cdot \beta_A^{-1} / [L_p / (m_C - 1)C]^{1/2} \approx 361 \text{ кА.}$$
 Эти расчетные данные для амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока наглядно показывают нам, что принятая в мощном генераторе ГИТ-А схема установки защитных керамических резисторов ТВО-60-24 Ом обеспечивает практически 43-х кратное ограничение аварийного сверхтока при электрическом пробое одного из его высоковольтных конденсаторов типа ИК-50-3. Приведенные выше результаты могут свидетельствовать о высокой эффективности используемой в мощном высоковольтном генераторе ГИТ-А тока молнии разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» термомеханической защиты его высоковольтных импульсных конденсаторов от аварийных сверхтоков, возникающих в случае электрического пробоя их наружной или внутренней изоляции, то есть в случае наступления режима короткого замыкания в цепи мощного ЕНЭ.

Выводы

1. Разработан инженерно-технический подход к приближенному расчету основных показателей термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов мощного ЕНЭ от аварийного сверхтока, основанной на применении в его зарядно-разрядных цепях защитных высоковольтных керамических резисторов типа ТВО-60. В число таких показателей рассматриваемой защиты конденсаторов зарядно-разрядных цепей мощного ЕНЭ входит ограничение амплитуды I_{mp} аварийного сверхтока, амплитуды P_m гидродинамического давления внутри пробитого маслonaполненного конденсатора и максимального значения T_m термодинамической температуры в локальной зоне внутреннего электрического пробоя высоковольтного конденсатора мощного ЕНЭ, а также прерывание аварийного сверхтока за счет возможного взрывообразного разрушения защитных керамических резисторов на высоковольтном выводе пробитого сильноточным электрическим разрядом конденсатора ЕНЭ.

2. Предложенные в рамках расчетной оценки основных показателей термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов зарядно-разрядных цепей мощных ЕНЭ приближенные соотношения (2)–(4) прошли определенную практическую апробацию на действующем натурном образце мощного высоковольтного ЕНЭ разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (высоковольтном генераторе ГИТ-А [11,13]), активно используемого в настоящее время на экспериментальной базе института при испытаниях объектов авиационной и ракетно-космической техники на стойкость к прямому воздействию на них тока искусственной молнии с нормированными в соответствии с международными требованиями амплитудно-временными параметрами.

Список литературы: 1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 2. Гультый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 3. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с. 4. Баранов М.И. Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 13-20. 5. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: «Точка», 2014. – 400 с. 6. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с. 7. Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н. и др. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с. 8. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с. 9. Баранов М.И., Лысенко В.О. Основные характеристики сильноточного плазменного канала подводного электрического разряда // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 2-8. 10. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с. 11. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81–85. 12. Баранов М.И. Расчет процесса энергвыделения в цилиндрических токпроводах электрофизических установок высокого напряжения // Электричество. – 1992. – № 4. – С. 6-10. 13. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПІ», 2010. – 407 с.

Bibliography (transliterated): 1. Tehnika bol'shikh impul'snyh tokov i magnitnyh polej. Pod red. V.S. Komel'kova. Moscow: Atomizdat, 1970. 472 s. Print. 2. Gulyj G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij. Kiev: Naukova dumka, 1990. 208 s. Print. 3. Mesjac G.A. Impul'snaja jenergetika i jelektronika. Moscow: Nauka, 2004. 704 s. Print. 4. Baranov M.I. Vybory i ustanovka zashhitnyh vysokovol'tnyh keramicheskix rezistorov v zarjadno-razrjadnyh cepjakh moshnyh emkostnyh nakopitelej jenergii. Visnik NTU «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokix naprug». Khar'kiv: NTU «HPI», 2014. № 50 (1092). S. 13–20. Print. 5. Baranov M.I. Izbrannye voprosy jelektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika jelektrofizicheskix zadach. Khar'kiv: «Tochka», 2014. 400 s. Print. 6. Nejman L.R., Demirchjan K.S. Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: V 2-h t. Uchebnik dlja vuzov. Tom 1. Leningrad: Jenergoizdat, 1981. 536 s. Print. 7. Berzan V.P., Gelikman B.Ju., Guraevskij M.N. i dr. Jelekticheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki. Moskva: Jenergoatomizdat, 1987. 656 s. Print. 8. Lozanskij Je.D., Firsov O.B. Teorija iskry. Moskva: Atomizdat, 1975. 272 s. Print. 9. Baranov M.I., Lysenko V.O. Osnovnye karakteristiki sil'notochnogo plazmennogo kanala podvodnogo jelektricheskogo razrjada. Jelektritchestvo. 2012. №4. S.2–8. Print. 10. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki. Otv. red. V.K. Tartakovskij. Kiev: Naukova dumka, 1989. 864 s. Print. 11. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja na-turnykh ispytanj tehniceskix ob'ektov. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2008. № 3. S.81–85. Print. 12. Baranov M.I. Raschet processa jenergovydelenija v cilindricheskix tokoprovodah jelektrofizicheskix ustanovok vysokogo naprjazhenija. Jelektritchestvo. 1992. № 4. S. 6-10. Print. 13. Baranov M.I. Izbrannye voprosy jelektrofiziki. Tom 2, Kn. 2: Teorija jelektrofizicheskix jeffektov i zadach. Khar'kiv: NTU «HPI», 2010. 407 s. Print.

Поступила (received) 08.09.2014

М.И. БАРАНОВ, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
Г.М. КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
О.С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ, вед. инженер, НТУ «ХПИ»;
А.В. ПЛИЧКО, мл. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
Е.Г. ПОНУЖДАЕВА, зав. лаб., НТУ «ХПИ»

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИСКРОВОЙ РАЗРЯДНИК С ГРАФИТОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ РВГУ-50

В статье представлены технические характеристики и описание конструкции высоковольтного искрового разрядника РВГУ-50. Разрядник предназначен для коммутации разрядной цепи имитатора импульсного тока молнии с амплитудой до 220 кА при длительности импульса до 350 мкс. Длительность фронта импульса тока – от единиц до десятков мкс. Графитовые электроды разрядника обеспечивают значительный ресурс эксплуатации имитатора при проведении испытаний технических средств на стойкость к воздействию прямого удара молнии с параметрами, соответствующими максимальным разрушающим факторам. Разрядник РВГУ-50 прошел испытания на действующем имитаторе импульсного тока молнии.

Ключевые слова: управляемый разрядник, графитовые электроды, имитатор импульсного тока молнии.

Введение. Современные требования к обеспечению необходимого уровня надежности и безопасности эксплуатации систем, объектов и элементов электроэнергетики, аэрокосмической техники и иных технических средств (ТС) определяют уровень стойкости к воздействию разрушающих факторов прямого удара молнии (разряда молнии – РМ). Ряд нормативных государственных и международных документов [1–3] регламентируют уровни (степени) жесткости испытаний широкой номенклатуры ТС, определяя параметры воздействия, адекватные РМ, такие как амплитудно-временные параметры импульса тока молнии, количественные показатели переносимого заряда как в отдельных составляющих РМ, так и суммарного.

Проведение различного вида испытаний ТС на воздействие РМ требует разработки, создания и ввода в эксплуатацию сертифицированных испытательных стендов, основой которых являются генераторы импульсных токов (ГИТ), обеспечивающие при работе в заданном алгоритме необходимые параметры импульсов тока РМ в целом, либо их составляющих (компонент), указанных в соответствующих нормативных документах.

Один из таких испытательных стендов был разработан и введен в эксплуатацию в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (г. Харьков) в 2007 г. [4]. Он содержит несколько ГИТ, основой которых являются емкостные накопители

энергии (ЕНЭ), выполненные на базе высоковольтных импульсных конденсаторов. ЕНЭ заряжаются до требуемых уровней зарядного напряжения $U_{зар}$ с последующим разрядом их в цепях разрядного контура, содержащих элементы, формирующие амплитудно-временные параметры импульса тока, испытываемое ТС, а также управляемые и неуправляемые коммутаторы (сильноточные искровые разрядники). Основные технические характеристики и конструктивные особенности разработанных нами разрядников представлены в [5, 6].

Постановка задачи. Опыт эксплуатации управляемого разрядника со стальными электродами [5] в разрядной цепи импульсного тока РМ (компонента А [1, 2]) показал, что для получения имитируемого тока молнии с амплитудой 200 кА, длительностью 350 мкс. и интегралом действия единичного импульса до $10 \cdot 10^6$ Дж/Ом [3] необходимо применение более стойких к разрушающему действию РМ материалов. В этой связи в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» разработан и изготовлен высоковольтный управляемый сильноточный воздушный искровой разрядник с графитовыми электродами типа РВГУ-50. Применение графита для материалов электродов искрового промежутка разрядника прошло апробацию на испытательном стенде [4, 6] и позволяет надеяться, что параметры надежности и долговечности разрядника РВГУ-50 будут удовлетворительны при эксплуатации его в составе имитаторов импульса тока РМ с требованиями, указанными в [3].

Описание разрядника РВГУ-50. На рис. 1 представлен общий вид РВГУ-50 (далее – разрядника).

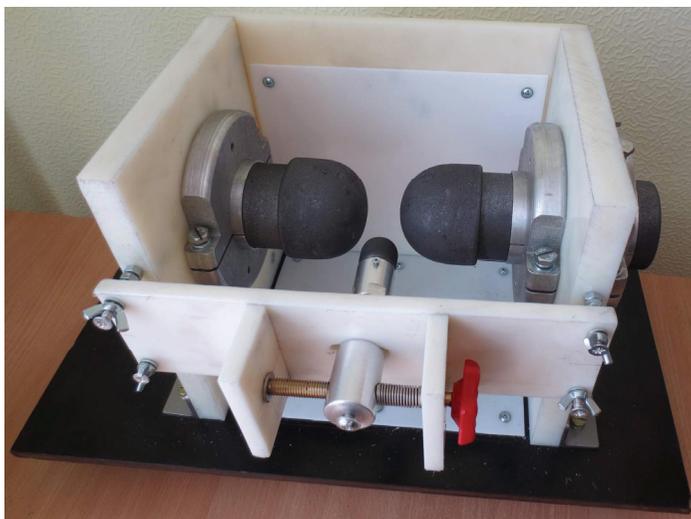


Рисунок 1 – Общий вид высоковольтного управляемого разрядника с графитовыми электродами РВГУ-50

Основные технические характеристики разрядника РВГУ-50 представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики разрядника РВГУ-50

Наименование характеристики	Величина	Примечания
1. Максимальное постоянное напряжение между основными электродами U_m , кВ	50	Длительно допустимое, обеих полярностей
2. Максимально допустимый ток I_m , кА	220	Форма импульса тока близка к аperiодической экспоненциальной
3. Максимальный заряд, переносимый импульсом тока Q_m , Кл	100	Заряд при коммутации единичного импульса
4. Интеграл действия единичного импульса тока J , $A^2 \cdot c$, не более	$10 \cdot 10^6$	$J = \int_0^t i^2(t) dt$
5. Частота следования импульсов тока $F_{им}$, не более	1 имп. в 2 мин.	
6. Амплитуда напряжения импульсов поджига U_p , кВ	от 30 до 70	Полярность импульса согласуется с полярностью напряжения между основными электродами
7. Длительность фронта импульса напряжения поджига $\tau_{ф}$, мкс	от 1 до 7	
8. Габаритные размеры разрядника, мм x мм x мм	360 x 300 x 320	
9. Масса разрядника, кг, не более	15	

Расчетная величина омического сопротивления разрядника при удельном сопротивлении графита $\rho = 15 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – не более 5 мОм.

Конструкция электродной системы разрядника представлена ниже на рис. 2.

Каждый из двух основных графитовых электродов (ОГЭ) 5 (рис. 2) имеет полусферическую рабочую поверхность и цилиндрическую контактную часть, размещенную в разрезной цилиндрической муфте 1. Муфта прижимается разрезными металлическими фланцами 2 и 4 к цилиндрической части ОГЭ, обеспечивая большую площадь переходных контактов, необходимую для передачи импульсных токов с амплитудой до 220 кА. Расстояние «а» между ОГЭ может регулироваться в пределах от 1 мм до 20 мм путем перемещения соосных ОГЭ вдоль оси X. Перемещение ОГЭ осуществляется при ослаблении крепежа стяжки разрезных фланцев.

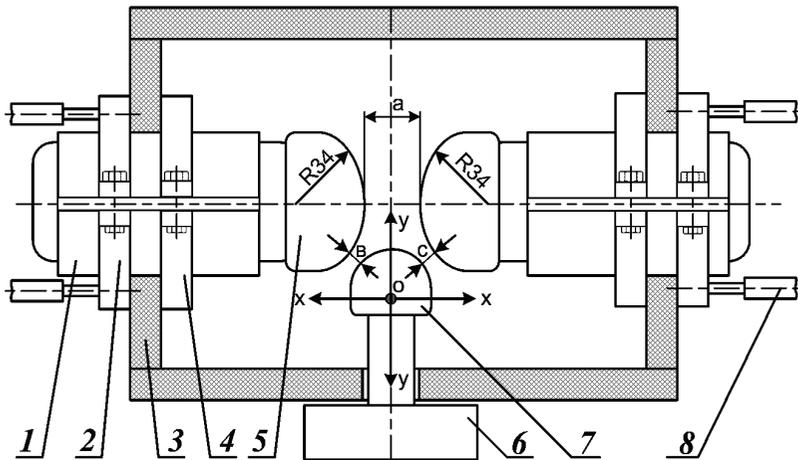


Рисунок 2 – Конструкция электродной системы разрядника: 1 – разрезные муфты; 2, 4 – разрезные фланцы; 3 – изоляционные панели корпуса; 5 – основные графитовые электроды; 6 – устройство перемещения электрода управляемого поджига (ЭУП) по осям x и y ; 7 – графитовый ЭУП; 8 – токопровод разрядного контура ГИТ

ЭУП имеет графитовый электрод с полусферической рабочей поверхностью (радиус сферы 14 мм), закрепленный в устройстве перемещения 6, и может перемещаться по осям X и Y , что позволяет менять размеры поджигающих искровых промежутков « b » и « c » между ЭУП и ОГЭ. Эта операция необходима для обеспечения надежного управляемого запуска в широком диапазоне напряжений $U_{\text{зар}}$ ЕНЭ и поджигающего импульса $U_{\text{п}}$.

Корпус разрядника изготовлен из изоляционного материала (капрлона), обеспечивающего необходимую электрическую прочность изоляции между ОГЭ при максимальном рабочем напряжении $U_{\text{зар}} = 50$ кВ.

Панели корпуса с внутренней стороны, обращенной к искровому промежутку ОГЭ, защищены от воздействия температуры и загрязнений распыленным графитом накладками из листового фторопласта толщиной 1 мм.

Разрядник устанавливается на рабочем столе испытательного стенда на четырех опорных изоляторах BUS-BAR-SM-57 высотой 57 мм.

Токопроводы 8 разрядного контура ГИТ присоединяются специальными крепежными элементами к наружным разрезным фланцам 2 (см. рис. 2). В зависимости от требований к организации токопроводов разрядного контура ГИТ к фланцам 2 могут быть присоединены как кабельные токопроводы, так и плоские медные шины.

Контрольные испытания разрядника. Целью контрольных испытаний разрядника было определение зависимости пробивного постоянного напряжения $U_{\text{пр}}$ от величины искрового промежутка « a » между ОГЭ в режиме самопробоя (при отсутствии импульса напряжения управляемого поджига).

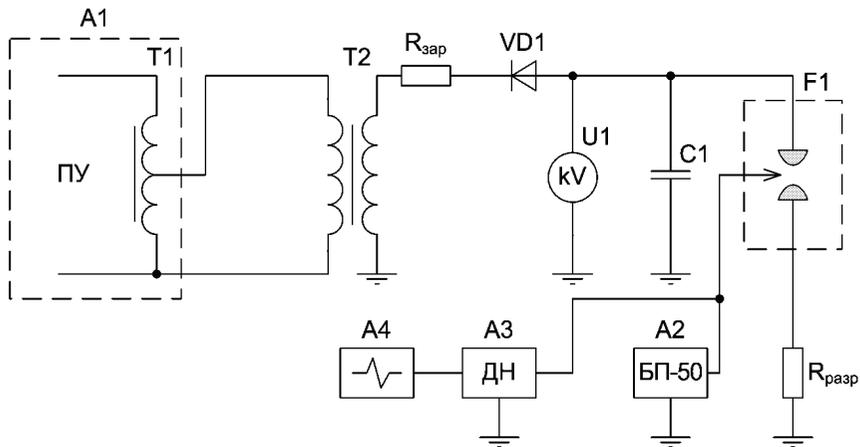


Рисунок 3 – Схема электрическая высоковольтного испытательного стенда: А1 – пульт управления (ПУ); Т1 – регулировочный автотрансформатор ПУ; Т2 – высоковольтный трансформатор ИОМ-100; $R_{зар}$ – зарядный токоограничивающий резистор сопротивлением 4,8 МОм; VD1 – диод высоковольтный; U1 – киловольтметр С-100; С1 – конденсатор ИМН-100-0,4 мкФ; F1 – испытуемый разрядник; $R_{разр}$ – разрядный резистор сопротивлением 8 Ом; А2 – блок поджига БП-50; А3 – делитель напряжения импульсный ДЕД-75; А4 – осциллограф цифровой TDS-1012 "Tektronix"

Испытания проведены на высоковольтном испытательном стенде, принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 3.

В ходе испытаний напряжение пробоя F1 (в режиме самохода или управляемого поджига) контролировалось киловольтметром U1.

Амплитудно-временные параметры импульса поджига фиксировались цифровым осциллографом А4.

На рис. 4 представлен график зависимости пробивного напряжения $U_{пр}$ F1 от расстояния «а» на самоходе, при отрицательной полярности $U_{зар}$ и удаленном поджигающем электроде.

На рис. 5 представлена осциллограмма импульса напряжения поджига $U_{п}$ с пробоем промежутка «с» = 10 мм между основным и поджигающим электродами (основной электрод соединен с $R_{разр}$.); «а»=10 мм. Импульс поджига создавался генератором поджигающих импульсов «Блок поджига БП-50» [7], работающим в режиме ручного управления.

Амплитуда напряжения пробоя промежутка «с» $U_{пр.} = 32$ кВ; время пробоя $t_{пр} = 2,7$ мкс (коэффициент деления ДЕД-75 $K = 1550$)

В ходе проведения испытаний созданного разрядника было установлено, что напряжение пробоя $U_{пр}$ промежутка «а» между ОГЭ в режиме самохода при отрицательной и положительной полярности $U_{зар}$ практически совпадает; зависимость $U_{пр}$ от величины промежутка «а» линейна в диапазоне изменения «а» от 1 мм до 10 мм.

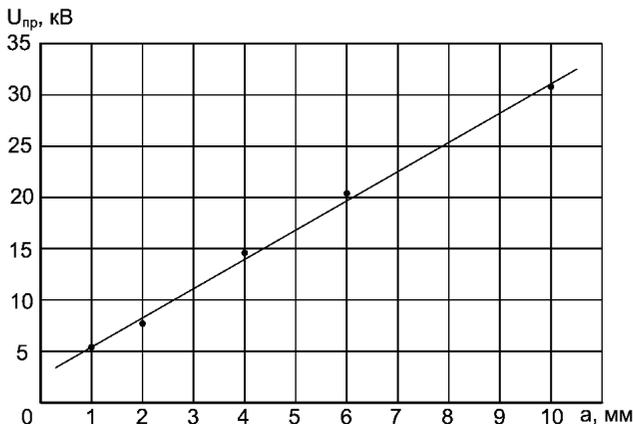


Рисунок 4 – Зависимость пробивного напряжения от расстояния между ОГЭ

Проведена проверка электрической прочности изоляции разрядника; при величине промежутков «а», «в» и «с», равным 20 мм, изоляция разрядника выдержала воздействие напряжения $U_{зар} = 55$ кВ как положительной так и отрицательной полярности в течение трех минут без пробоя.

Результаты экспериментальной апробации работы разрядника РВГУ–50 в составе имитатора импульса тока молнии

Апробация работы разрядника РВГУ-50 произведена на экспериментальной базе НИПКИ «Молния». Разрядник был смонтирован на рабочем столе мощного генератора импульсного тока ГИТМ-10/350, предназначенного для имитации импульсов тока молнии с амплитудой (200 ± 20) кА, длительностью фронта импульса $\tau_{ф} = (10 \pm 2)$ мкс и длительностью импульса $\tau_{и}$ в пределах $(270 - 370)$ мкс. Разрядник РВГУ-50 установлен в разрядную цепь трех параллельно работающих высоковольтных ГИТ:

- ГИТ-1, содержащий 32 параллельно соединенных высоковольтных импульсных конденсатора (ВИК);
- ГИТ-2, содержащий 102 параллельно работающих ВИК;
- ГИТ-3, содержащий 111 параллельно соединенных ВИК;

В качестве ВИК использованы конденсаторы ИК-50-3. В процессе проведения апробации разрядника РВГУ-50 зарядное напряжение $U_{зар}$ конденсаторов – 15 кВ (полярность отрицательная). Синхронно с ГИТ-1 – ГИТ-3 на общую активно-индуктивную нагрузку ($R = 0,1$ Ом, $L = 1$ мкГн) разряжался ГИТ-4, содержащий 288 ВИК типа ИМ2-5-140, заряжаемых в описываемом эксперименте до напряжения 2,1 кВ. Разряд ГИТ-4 коммутировался двух-электродным разрядником с графитовыми электродами РВГ-10 [6], пробой которого осуществлялся синхронно с пробоем основного межэлектродного промежутка разрядника РВГУ-50 при подаче на его управляющий электрод

высоковольтного импульса поджига от генератора поджигающих импульсов ГПИ-100 [4]. Инициация разряда ГИТов на общую нагрузку осуществлялась взрывающимся проводником (медная проволока диаметром 0,2 мм, длиной 50 мм).

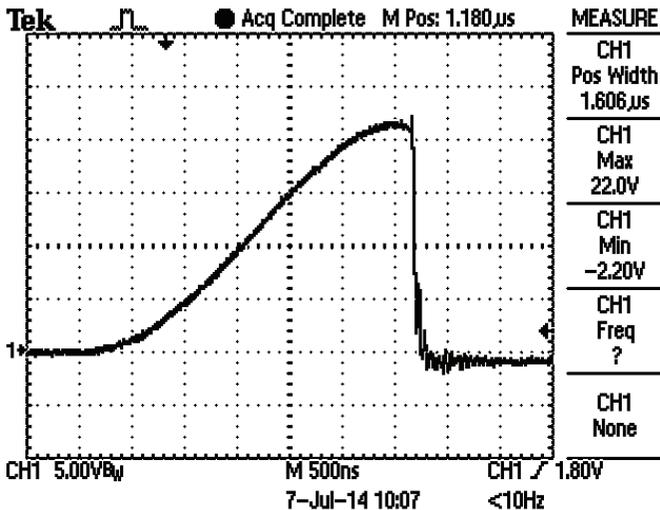


Рисунок 5- осциллограмма импульса напряжения поджига U_n с пробоем промежутка «с» = 10 мм между основным и поджигающим электродами (основной электрод соединен с $R_{разр.}$); «а»=10

На рис. 6 представлен внешний вид рабочего стола генератора тока искусственной молнии ГИТМ-10/350 с установленным на нем разрядником РВГУ-50.

На рис. 7 приведена осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии, полученного в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТМ-10/350 на стадии его пуска-наладки.

Осциллограмма была зарегистрирована цифровым запоминающим осциллографом Tektronix TDS 1012. Сигнал, пропорциональный амплитудно-временным параметрам импульса тока в нагрузке, подавался на осциллограф от измерительного шунта ШК-300 [8] с коэффициентом преобразования $11,26 \cdot 10^3$ А/В.

Все используемые при испытаниях разрядника измерительные приборы прошли поверку в государственных метрологических службах.

Расшифровка осциллограмм серии импульсов дала следующие результаты:

- амплитуда импульса тока $I_m=160$ кА;
- длительность импульса тока (на уровне $0,5 I_m$) $\tau_n = 275$ мкс.

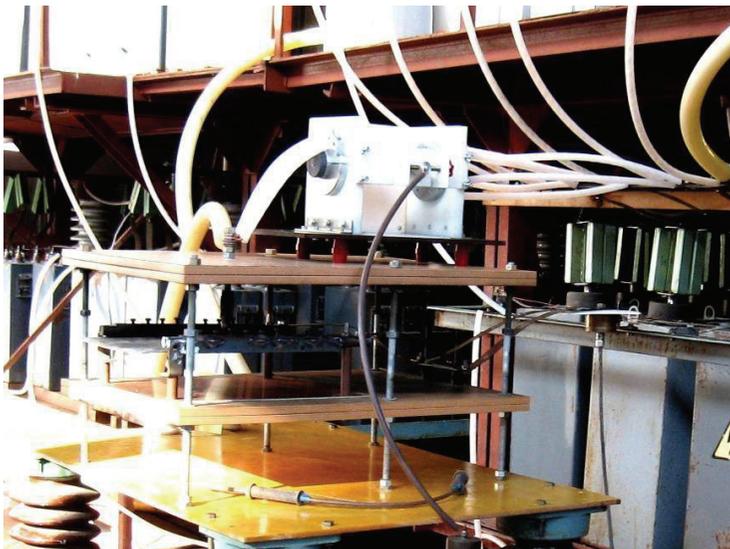


Рисунок 6 – Внешний вид рабочего стола генератора тока молнии ГИТМ-10/350 с установленным на нем разрядником PBГУ-50

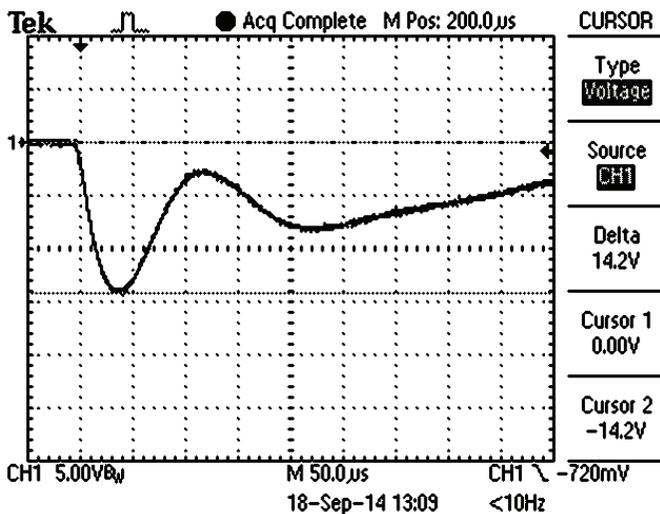


Рисунок 7 – Осциллограмма импульса тока искусственной молнии амплитудой $I_m = 160$ кА

Анализ полученных результатов позволяет предполагать, что при зарядных напряжениях $U_{зар}$ конденсаторов генераторов ГИТ-1, ГИТ-2, ГИТ-3 равным 20 кВ и зарядном напряжении конденсаторов генератора ГИТ-4, равном

4,2 кВ (полярность зарядных напряжений - отрицательная), следует ожидать величину τ_n равной (350±35) мкс и величину I_m равной (200±20) кА.

Визуальное обследование состояния двух основных и одного управляющего графитовых электродов испытываемого в разрядной цепи генератора ГИТМ-10/350 сильноточного трехэлектродного разрядника типа РВГУ-50 после коммутаций им пяти аperiодических импульсов тока амплитудой $I_m = 160$ кА показало, что негативного электротермического и электродинамического действия каналов сильноточных искровых разрядов на рабочие поверхности графитовых электродов разрядника не наблюдается. Полученные результаты экспериментальной апробации разработанного и изготовленного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» высоковольтного сильноточного трехэлектродного воздушного управляемого разрядника с графитовыми электродами типа РВГУ-50 подтверждают правильность принятых технических решений при его создании.

Выводы

1. Создан высоковольтный сильноточный трехэлектродный воздушный управляемый разрядник с графитовыми электродами типа РВГУ-50.

2. Экспериментальная апробация на действующем мощном высоковольтном генераторе тока искусственной молнии ГИТМ-10/350 подтвердила работоспособность сильноточного трехэлектродного воздушного управляемого разрядника с графитовыми электродами типа РВГУ-50, разработанного и изготовленного в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ».

Список литературы: 1. Нормативный документ SAE ARP 5412/ED84. «Рекомендуемая практика авиационно-космических работ. Идеализированная составляющая внешнего тока». – США, 1985. – С. 30-39. 2. Нормативный документ КТР-ВВФ/ДО-160Д/ЕД-14Д. Квалификационные требования. Раздел 23.0. «Прямое воздействие молнии». – Россия, 2004. – С. 258-273. 3. Нормативный документ ДСТУ ІЕС62305-01-2003 «Захист від блискавки, частина 1: Загальні положення». – Київ, 2009. 4. Баранов М.И. Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии / М.И. Баранов, Г.М. Колушко, В.И. Кравченко, О.С. Недзельский // *Электротехника і Електромеханіка*. – 2008. – № 3 – С. 69-75. 5. Баранов М.И. Высоковольтный сильноточный трехэлектродный каскадный воздушный разрядник генератора тока искусственной молнии / М.И. Баранов Г.М. Колушко, В.И. Кравченко, О.С. Недзельский, М.А. Носенко // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2008. – №21 – С. 3-12. 6. Баранов М.И. Мощный высоковольтный малогабаритный двухэлектродный воздушный разрядник генератора тока молнии / М.И. Баранов Г.М. Колушко, В.И. Кравченко, О.С. Недзельский, М.А. Носенко // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2007. – № 34 – С. 3-8. 7. Доценко В.И. Генератор поджигающих импульсов «Блок поджига БП-50 / В.И. Доценко, В.М. Жинжиков, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждаева, В.Г. Фоменко // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2006. – № 17 – С. 43-46. 8. Днищенко В.Н. Измерительный шунт ШК-300 для определения амплитудно-временных параметров имитированного импульса тока молнии / В.Н. Днищенко, В.О. Еремеев, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждаева // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2007. – № 20. – С. 75-79.

Bibliography (transliterated): 1. Normativnyj dokument SAE ARP 5412/ED84 «Rekomenduemaya

практика авиационно – космических работ. Идеализированная составляющая внешнего тока». SShA 1985. 30-39. Print. **2.** Normativnyj dokument KTR VVF/DO-160D/ED-14D. Kvalifikacionnye trebovaniya. Razdel 23.0 «Pryamoe vozdejstvie molnii» Rossiya, 2004. 258-273. Print. **3.** Normativnyj dokument DSTU IEC 62305-01-2003 «Zahist vid bliskavki. Chastina 1 «Zagalni polozhennya», Kijv, 2009. Print. **4.** M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, O.S. Nedzelskij: «Moshchnaya vysokovoltная ehlektrofizicheskaya ustanovka dlya imitacii polnogo toka molnii». Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2008. №3. 69-75. Print. **5.** M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, O.S. Nedzelskij, M.A. Nosenko: «Vysokovoltный silnotochnyj trekhelektrodnyj kaskadnyj vozdušnyj rozryadnik generatora toka iskusstvennoj molnii» Vestnik NTU «KhPI». Tem. Vypusk: Tekhnika i ehlektrofizika vysokih napryazhenij. Kharkov: NTU «KhPI». 2008. №21. 3-12. Print. **6.** M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, O.S. Nedzelskij, M.A. Nosenko: «Moshchnyj vysokovoltный malogabaritnyj dvuhelektrodnyj vozdušnyj rozryadnik generatora toka molnii». Vestnik NTU «KhPI». Tem. Vypusk: Tekhnika i ehlektrofizika vysokih napryazhenij. – Kharkov: NTU «KhPI». 2007. №34. 3-8. Print. **7.** V.I. Docenko, V.M. Zhinzhiikov, O.S. Nedzelskij, E.G. Ponuzhdaeva, V.G. Fomenko: «Generator podzhigayushchih impulsov «Blok podzhiga BP-50». Vestnik NTU «KhPI». Tem. Vypusk: Tekhnika i ehlektrofizika vysokih napryazhenij. Kharkiv: NTU «KhPI». 2006. №17. 43-46. Print. **8.** V.N. Dnishhenko, V.O. Eremeev, O.S. Nedzelskij, E.G. Ponuzhdaeva: «Izmeritel'nyj shunt ShK-300 dlya opredelenija amplitudno-vremennyh parametrov imitirovannogo impul'sa toka molnii». Vestnik NTU «HPI». Tem. vypusk: Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij. – Khar'kiv: NTU «HPI». 2007. №20. 75-79. Print.

Поступила (received) 17.10.2014

УДК 621.316.99

И.Н. БОГАТЫРЕВ, доцент, НТУ «ХПИ»;

В.И. ДОЦЕНКО, канд. техн. наук, вед. инженер, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;

А.В. ПЛИЧКО, мл. науч. сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КДЗ-1У

В статье рассмотрена модернизация комплекса КДЗ-1У для диагностики заземляющих устройств, в результате которой было снижено его энергопотребление, уменьшены массогабаритные показатели, повышена эргономичность и точность определения параметров заземляющих устройств. Этого удалось достичь за счет повышения КПД генератора, замены трансформаторного блока питания на импульсный, улучшения измерительной части комплекса, изменения системы управления.

Ключевые слова: модернизация, диагностики заземляющих устройств.

Введение. В электротехнических устройствах (открытые и закрытые распределительные устройства, автоматические телефонные станции, нефтеперекачивающие станции, машинные и компьютерные залы и т.д.) безопас-

© И.Н. Богатырев, В.И. Доценко, А.В. Пличко, 2014

ная эксплуатация и нормальное функционирование в значительной, мере определяется качеством выполнения заземляющего устройства (ЗУ), которое выполняет следующие функции: обеспечение защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции (уменьшение напряжения прикосновения, уравнивание и выравнивание потенциалов); обеспечение нормальных и аварийных режимов работы электроустановок (срабатывание защит от замыкания на землю; срабатывание защит от перенапряжений; электромагнитная совместимость устройств РЗА и АСУ ТП; отведение в грунт рабочих и аварийных токов, а также токов молнии; защита от статического электричества; защита коммуникаций от токовых перегрузок); обеспечение взрыво- и пожаробезопасности в электроустановках.

Анализ проблемы. Электромагнитная диагностика состояния ЗУ выполняется в соответствии с нормативным документом СОУ 31.2-21677681-19:2009 «Испытание и контроль заземляющих устройств электроустановок. Типовая инструкция», который предусматривает определение параметров ЗУ с использованием измерительного комплекса КДЗ-1У [1], введенным в Ресстр измерительной техники, допущенным к применению в Украине.

Силовая часть КДЗ-1У была разработана в 2000г., а первая модернизация была проведена в 2006 г. [2], в ходе которой совершенствовалась система управления генератором (выполнен переход от аналогового на микропроцессорное управление). С тех пор схмотехника и элементная база радиоэлектронных устройств значительно изменилась, что позволило провести последующую модернизацию комплекса.

Цель модернизации:

- повышение надежности устройства за счет уменьшения количества элементов схемы;
- повышение технологичности изготовления устройства;
- повышение КПД источника питания и выходного усилителя;
- уменьшение массогабаритных параметров устройства.

Методу устранения недостатков. Для достижения поставленной цели были полностью переработаны узлы блока питания, усилителя мощности и измерительная часть устройства.

Структурная схема модернизированного КДЗ приведена на рис. 1.

Основой устройства является *DDS*-генератор, на микросхеме AD9833 фирмы Analog Device. При тактировании микросхемы *DDS* от образцового кварцевого генератора *G* импульсами частотой 8 МГц разрешение для выходного синусоидального сигнала составляет 0,008 Гц. Установка выходной частоты *DDS*-генератора осуществляется микроконтроллером *МК* (АТХmega32А4U) программно через SPI интерфейс.

Выбор частоты выходного сигнала (57Гц, 211Гц, 419Гц) осуществляется

переключателем $S1$, а подстройка установленного значения при помощи энкодера $SQ1$.

Задание амплитуды выходного сигнала генератора производится энкодером $SQ2$ и микроконтроллером $МК$ при помощи встроенного в него цифроаналогового преобразователя ($ЦАП$) используемого в качестве цифрового потенциометра.

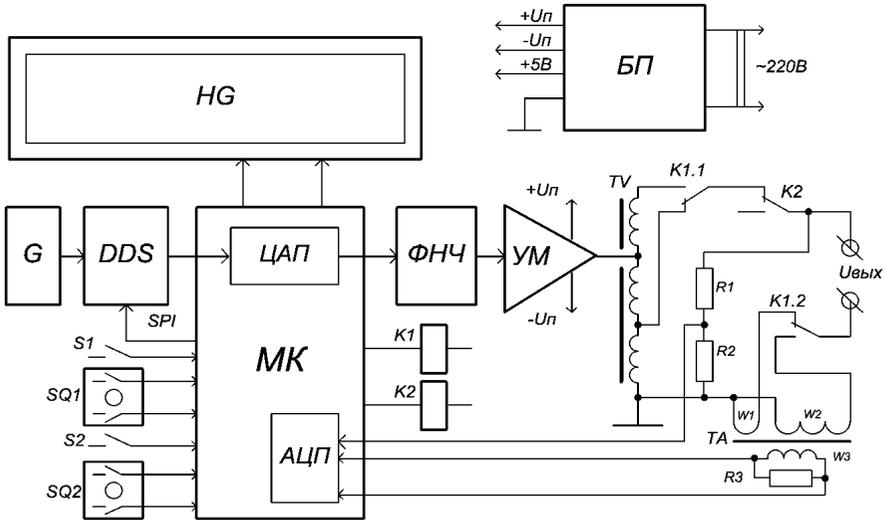


Рисунок 1 – Структурная схема модернизированного КДЗ

Выбор режима работы устройства «А/мА» осуществляется переключателем $S2$. При этом, микроконтроллер при помощи реле $K1$ подключает выходные клеммы устройства к соответствующим выводам автотрансформатора $ТВ$.

Значение выходной частоты генератора, выходного напряжения и тока, а также полного сопротивления нагрузки отображается на дисплее $НГ$.

Замена традиционного блока ($БП$) питания с использованием сетевого трансформатора на импульсный дала возможность уменьшить его массогабаритные параметры и повысить КПД до 82 %.

За счет использования в качестве выходного усилителя мощности микросхемы $IRS2092$ (ШИМ усилитель класса D) удалось довести КПД $УМ$ до 94 %. При этом, площадь радиатора $УМ$ уменьшилась более чем в четыре раза и появилась возможность отказаться от применения вентилятора для охлаждения устройства.

Модернизации подверглась схема измерительной части прибора. В предыдущей версии устройства измерялось средневыпрямленное значение выходного тока и напряжения. Для этого в схеме были установлены два прецизионных ана-

логовых двухполупериодных выпрямителя с фильтрами на выходах. Такое решение значительно усложняло схему устройства и требовало применения дорогостоящих операционных усилителей. При этом выходной сигнал тока снимался с шунтов, установленных в выходных цепях генератора.

В модернизированном устройстве программно-аппаратно реализовано измерение действующего значения выходного тока и напряжения в соответствии с уравнениями (1) и (2)

$$I_{\text{вых}} = K_i * \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{j=0}^{N-1} i_j^2}; \quad (1)$$

$$U_{\text{вых}} = K_u * \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{j=0}^{N-1} u_j^2}, \quad (2)$$

где $I_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вых}}$ – вычисленные действующие значения выходного тока и напряжения; K_i и K_u – калибровочные коэффициенты; N – количество выборок измерительного сигнала; i_j и u_j – текущие значения выборок сигналов.

Кроме расчета действующих значений выходного тока и напряжения устройство вычисляет значение полного сопротивления нагрузки

$$Z_{\text{нагр}} = U_{\text{вых}} / I_{\text{вых}} \quad (3)$$

и полной мощности

$$S = U_{\text{вых}} * I_{\text{вых}}. \quad (4)$$

Текущее значение полной мощности используется микроконтроллером *МК* для предотвращения перегрузки усилителя мощности *УМ*. При превышении допустимого значения полной мощности в нагрузке в течение 2 секунд микроконтроллер отключает ее при помощи реле *К2*.

Из представленной на рис. 1 схемы видно, что измерительные сигналы выходного тока и напряжения подаются непосредственно на входы АЦП микроконтроллера. При этом сигнал напряжения снимается с делителя *R1*, *R2*, а сигнал тока с нагрузочного резистора трансформатора тока *ТА* – *R3*. Замена шунтовых датчиков трансформатором тока *ТА* дала возможность за счет простой коммутации числа витков его первичной обмотки ($W1=1$, $W2=10$ витков) реализовать два диапазона измерения тока и исключить из схемы второй измерительный канал тока.

Выводы. Таким образом, модернизация устройства позволила снизить его энергопотребление, уменьшить массогабаритные показатели и повысить точность определения параметров ЗУ. Этого удалось достичь за счет следующих изменений: повышение КПД генератора путем модернизации схемотехнического решения усилителя мощности и блока питания; уменьшение энергопотребления путем исключения вентилятора охлаждения; уменьшение массы путем замены трансформаторного блока питания на импульсный. В результате проделанной работы выходная мощность генератора увеличена на 40 %, энергопотребление снижено на 30 %, масса устройства снижена на 12 %.

Список литературы: 1. Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г. Измерительные комплексы для диагностики состояния заземляющих устройств и электромагнитной обстановки на электроэнергообъектах. Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов / Под ред. Ю.В.Целебровского. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2002. – С. 95-103. 2. Богатырев И.Н., Доценко В.П., Недзельский О.С., Понуждаева Е.Г., Фоменко В.Г. Модернизированный измерительный комплекс "КДЗ-1У". // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 17. – С. 15-18.

Bibliography (transliterated): 1. Borisov R.K., Koliushko G.M., Koliushko D.G. Izmeritel'nye komplekсы dlja diagnostiki sostojanija zazemljajushhih ustrojstv i jelektromagnitnoj obstanovki na jelektroenergoob#ektah. Pervaja Rossijskaja konferencija po zazemljajushhim ustrojstvam: Sbornik dokladov. Pod red. Ju.V.Celebrovskogo. – Novosibirsk: Sibirskaja jenergeticheskaja akademija, 2002, s.95-103. Print. 2. Bogatyrev I.N., Docenko V.P., Nedzel'skij O.S., Ponuzhdaeva E.G., Fomenko V.G. Modernizirovannyj izmeritel'nyj kompleks "KDZ-1U". Vestnik NTU "HPI". – Khar'kiv: NTU "HPI", 2006, Vyp. 17, s. 15-18. Print.

Поступила (received) 15.10.2014

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Л.З. БОГУСЛАВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент, зав. отд. ИИПТ
НАН Украины, Николаев;

В.В. ДИОРДИЙЧУК, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ПЫЛИ ПОЛЕМ КОРОННОГО РАЗРЯДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрены вопросы эффективности улавливания пыли из промышленных газовых выбросов путем электростатической фильтрации, при одновременном питании коронного разряда в технологическом объеме различными типами постоянного, переменного и импульсного напряжения. Установлена взаимосвязь между длиной пролета частиц пыли по зоне фильтрации и эффективностью фильтрации. Экспериментально подтверждена квадратичная форма зависимости эффективности осаждения от величины питающего напряжения. Установлено повышение эффективности осаждения пыли при использовании комбинированного питания.

Ключевые слова: электростатическая фильтрация, длина пролета частиц, скорость дрейфа, форма питающего напряжения

Введение. Газовые выбросы химических, металлургических, текстильных, цементных предприятий, а также тепловых электростанций являются опаснейшими загрязнителями атмосферы и требуют фильтрации пыли, которая в них содержится. Использование электростатических фильтров (ЭФ)

© Л.З. Богуславский, В.В. Диордийчук, 2014

позволяет улавливать до 99 % пыли, уносимой промышленными газами, при этом являясь одним из наиболее эффективных способов очистки [1]. Тем не менее, работы направленные на снижение удельных затрат электроэнергии на очистку 1000 м³ газа без снижения качества не теряют своей актуальности. Учитывая, что большинство систем ЭФ в Украине морально устарели и их энергопотребление в 5-6 раз превосходит современные показатели развитых стран [2], использование новых систем питания ЭФ в комплексе с современными системами управления ими позволит значительно уменьшить удельные энергозатраты за счет повышения стабильности работы фильтрующих аппаратов.

Анализ предварительных исследований. Обычно для питания ЭФ применяют постоянное напряжение [1, 4]. Известен опыт применения переменного, прерывистого и других типов напряжения для повышения качества фильтрации в случае улавливания высокоомной пыли и агрессивных туманов [5]. В работах [4, 5] показано, что суммирование постоянного напряжения с импульсным может уменьшить запыленность газов на выходе ЭФ и снизить влияние эффекта обратного коронирования осадительного электрода (ОЭ). В ИИПТ НАН Украины ведутся работы над повышением эффективности работы существующих ЭФ с применением дополнительных импульсных высокочастотных источников питания [3] формирующих специальные формы напряжения, обеспечивающие как дозарядку пыли, так и эффективную деструкцию экологически опасных газовых выбросов путем использования стабильных стримерных разрядов [6]. Исследования [6, 7] показывают, что при применении разрядно-импульсных источников напряжения необходимо решать задачи синтеза их разрядных электрических цепей для оптимизации скорости нарастания разрядных токов в газовом промежутке ЭФ.

Целью работы является экспериментальное исследование степени влияния формы питающего напряжения на эффективность процесса осаждения пылевых частиц в поле коронного разряда из равномерного газового потока.

Экспериментальные исследования. Экспериментальный стенд для определения эффективности осаждения пылевых частиц при питании коронного разряда различными типами напряжения схематично изображен на рис. 1 и состоит из источника питания и макета электродной системы (ЭС) ЭФ и устройством подачи пыли. Применялся источник питания, описанный ранее в [8], на базе которого реализовывалось питание ЭС постоянным, переменным, импульсным и комбинированным напряжением. ЭС - двухэлектродная, выполнена в виде концентрических цилиндров и представляет собой пластиковую трубу 4, внутрь которой вставлена и закреплена оцинкованная труба 10 диаметром 100 мм длиной 1000 мм. Пластиковая труба использована для крепления растяжек центрального коронирующего электрода (КЭ) и как корпус ЭС. КЭ изготовлен из медной проволоки диаметром 0,3 мм длиной 1200 мм.

Устройство подачи пыли состоит смесителя 1, к которому подключен источник сжатого воздуха, и бункера подачи пыли 2. Выходное отверстие смесителя 1 расположено по оси с КЭ 12. В качестве пыли использовался строительный гипс марки Г-5.

Сжатый воздух, проходя по смесителю 1, втягивает пыль, загруженную в бункер подачи пыли 2, смешивается с ней, и со скоростью V_B попадает в корпус макета ЭС 4. К КЭ 12 приложено высокое напряжение источника 7, которое обуславливает зажигание коронного разряда 11 в разрядном промежутке ЭС. Частицы пыли, вдуваемые в макет ЭФ, подвергаются воздействию ионного ветра коронного разряда и приобретают электрический заряд. Под действием сил электрического поля частицы пыли двигаются в направлении ОЭ, после чего оседают на нем и удерживаются.

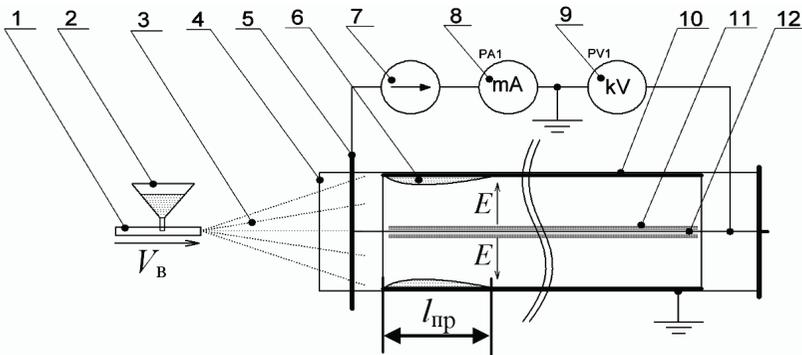


Рисунок 1 – Стенд для определения эффективности электрической фильтрации: 1 – смеситель; 2 – бункер подачи пыли; 3 – воздушно-пылевой поток; 4 – корпус макета ЭС ЭФ; 5 – шпилька натяжения КЭ; 6 – пыль, осевшая на ОЭ; 7 – источник высокого напряжения; 8 – миллиамперметр; 9 – киловольтметр; 10 – ОЭ; 11 – свечение коронного разряда; 12 – КЭ

Вдуваемая пыль влетает в макет ЭС со скоростью V_B и оседает внутри с некоторым распределением по длине, под действием сил электрического поля. Известно что, сила действует на частицу в радиальном направлении, а ее величина пропорциональна напряженности электрического поля и величине накопленного на частице заряда. Так же, из литературы известно, что максимальный заряд частицы пропорционален квадрату ее радиуса и накапливается за время 0,1 - 0,5 секунд [2].

$$Q_{np} = 4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) E_3 r^2, \quad (1)$$

где E_3 – напряженность электрического поля в той точке, где частица получает заряд, В/м; r – радиус частицы, м; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, Ф/м; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость частицы.

Движение заряженной частицы пыли в ЭФ характеризуется скоростью

дрейфа к ОЭ, которая определяется как [3]:

$$V_d = \frac{4\pi\varepsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}\right) E_{cp}^2 r}{6\eta}, \quad (2)$$

где V_d – скоростью дрейфа к ОЭ, м/с; E_{cp} – средняя напряженность электрического поля по длине пути частицы, В/м; η – коэффициент динамической вязкости среды, $(\text{Н} \cdot \text{с})/\text{м}^2$.

Из 4 видно, что теоретическая скорость дрейфа не зависит от скорости потока газа V_r , однако в реальных ЭФ используются такое понятие как эффективная скорость дрейфа $V_{\text{эф}}$, зависящая от всех параметров ЭФ, которые влияют на эффективность очистки. [4]

$$V_{\text{эф}} = \frac{h_0 V_r}{l_a} \ln \left(\frac{1}{1 - \eta_{\phi}} \right), \quad (3)$$

где h_0 – межэлектродное расстояние, м; V_r – скорость газа, м/с; l_a – длина активной зоны, м; η_{ϕ} – степень очистки газов.

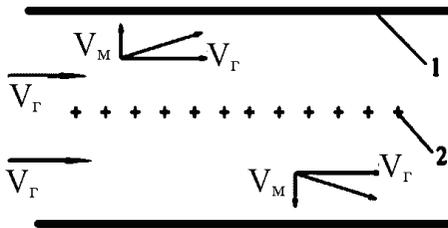


Рисунок 2 – Движение частиц пыли в межэлектродном промежутке, V_r – скорость газа, V_M – скорость дрейфа к ОЭ; 1 – ОЭ, 2 – КЭ

Время от попадания частицы в активную зону ЭС до осаждения на поверхность электрода $t_{\text{ос}} = h_0/V_d$, где h_0 межэлектродное расстояние, м; V_d – скорость дрейфа, м/с. Длина пролета пыли вдоль оси ЭС $l_{\text{пр}}$ м при скорости газа V_r м/с, $l_{\text{пр}} = h_0 V_r/V_d$. Поставляя скорость дрейфа из выражения (3) выражение для длин пролета $l_{\text{пр}}$, получим:

$$l_{\text{пр}} = \frac{h_0 V_r l_a}{h_0 V_r \ln \left(\frac{1}{1 - \eta_{\phi}} \right)} = \frac{l_a}{\ln \left(\frac{1}{1 - \eta_{\phi}} \right)}, \quad (4)$$

которое связывает глубину пролета частицы с эффективностью работы ЭФ. Таким образом, длина пролета пыли по активной зоне ЭС на основании известных выражений связана с эффективностью электрической фильтрации, что позволяет использовать простые методы измерения для оценки эффективности пылеулавливания.

В эксперименте коронный разряд зажегся при подаче напряжения на

центральный электрод макета ЭФ. Напряжение, приложенное к центральному КЭ, изменялось по форме – постоянное, переменное синусоидальное с частотой 50 Гц, импульсно периодическое двухполярное с частотой 10 кГц, постоянное с наложенными на него импульсами с различной частотой повторения. Пыль – строительный гипс, смешивалась с потоком воздуха и поступала в макет ЭФ. После завершения работы измерялась глубина пролета $l_{пр}$ пыли по длине макета от начала активной зоны, со стороны попадания пыли в активную зону. Постоянное, переменное напряжения варьировались по амплитуде. При использовании комбинированного напряжения величина постоянного напряжения фиксировалась, а варьировалась частота повторения импульсов. Амплитуда импульсов составляла $15 \text{ кВ} \pm 15 \%$, с фронтом нарастания 50 мкс и временем спада от 500 мкс - 700 мкс.

Результаты исследования. На рис. 3 показана ЭС макета ЭФ с осажденной на поверхности ОЭ пылью и процедура замера длины пролета пыли по длине ЭС.

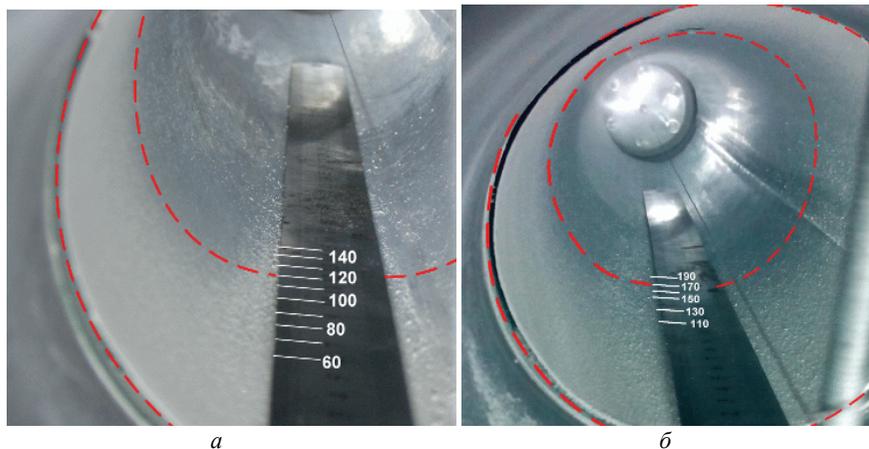


Рисунок 3 – Пыль, осевшая на стенках ОЭ: *а* – при питании постоянным напряжением 20 кВ, *б* – при питании постоянным и импульсным напряжением 25 Гц

На рис. 4 представлены сводные результаты измерения глубины пролета пылевых частиц при питании коронного разряда напряжением различных типов. Наихудшие результаты были получены при использовании импульсно-периодического напряжения питания частотой 10 кГц. Причины этого следующие: с одной стороны низкий уровень действующего значения напряжения не позволяет обеспечить устойчивое движение частиц к ОЭ, с другой стороны высокая амплитуда единичного импульса, по сравнению с действующим значением напряжения, приводит к пробое разрядного промежутка. Таким образом, искровой пробой промежутка происходит при низких уровнях действующего значе-

ния, которое недостаточно для эффективного пылеулавливания.

Минимальная глубина пролета пыли получена при использовании комбинированного напряжения. Постоянная составляющая напряжения фиксировалась на уровне 20 кВ и суммировалась с импульсами напряжения частотой следования 25 Гц. Подобный прирост эффективности пылеулавливания можно объяснить интенсификацией процессов заряда частиц пыли в неоднородном быстроизменяющемся электрическом поле, посредством увеличения количества столкновений частиц пыли с носителями заряда и роста плотности объемного заряда.

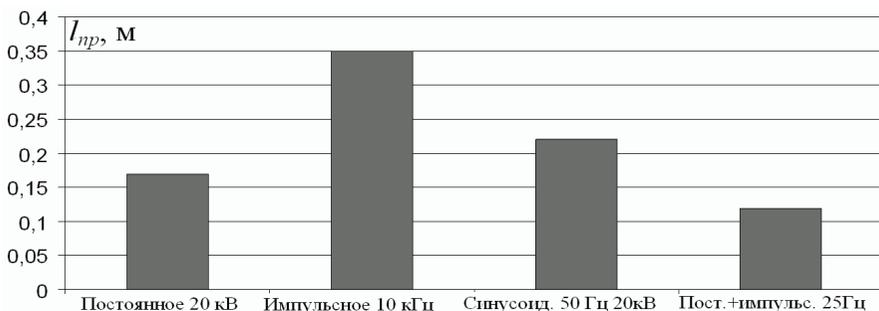


Рисунок 4 – Глубина пролета для различных типов питающего напряжения

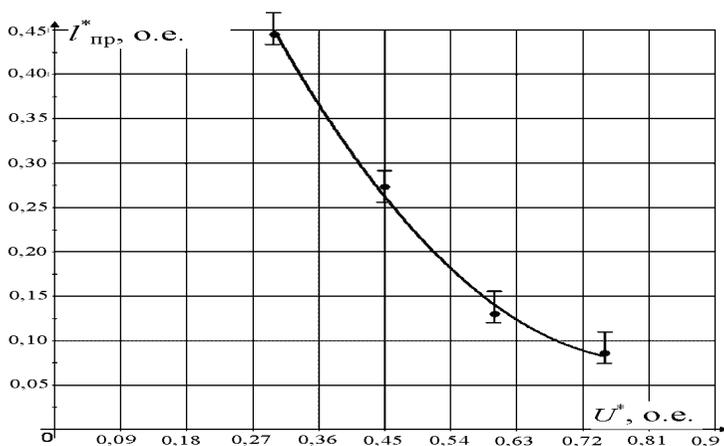


Рисунок 5 – Относительная длина пролета пыли в зависимости относительного напряжения

Длина пролета пыли при питании макета ЭС постоянным напряжением в относительных единицах представлена на рис. 5, где относительная длина пролета частицы определена как отношение фактической глубины пролета к длине активной зоны макета ЭС $l_{пр}^* = l_{пр}/l_a$, где $l_{пр}$ – глубина пролета, l_a – дли-

на активной зоны; а относительное напряжение определяется как отношение текущего напряжения к пробойному, $U^* = U/U_{пр}$, где $U_{пр}$ – пробойное напряжение кВ, U – текущее напряжение, кВ.

Из представленной зависимости видно, что относительная длина пролета пыли резко снижается при увеличении рабочего напряжения до уровня близкого к пробойному напряжению. Рост напряженности электрического поля внешней зоны коронного разряда обуславливает рост скорости дрейфа частицы к ОЭ. Представленная кривая хорошо описывается квадратичной зависимостью, что соответствует характеру выражения (2).

Суммирование импульсной составляющей различной частоты с уровнем постоянного напряжения 20 кВ приводит к уменьшению длины пролета частиц до 30 % по сравнению с питанием ЭС постоянным напряжением. Подобная тенденция сохраняется для более высоких частот следования импульсов.

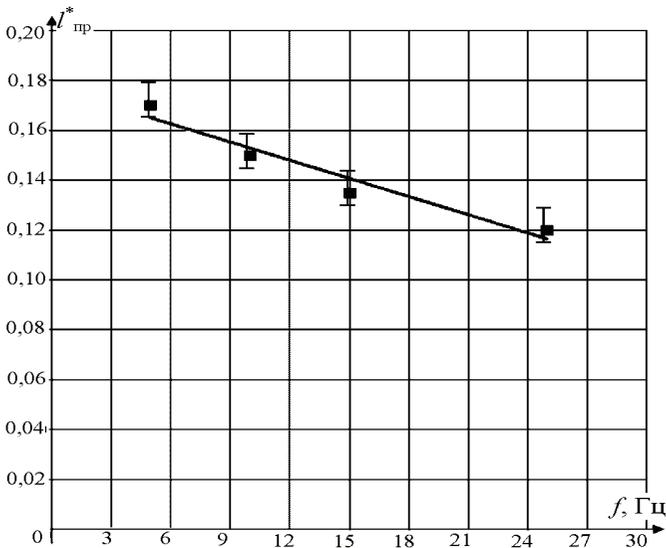


Рисунок 6 – Относительная длина пролета пыли при различных частотах следования импульсов, уровень постоянного напряжения 20 кВ

Выводы. В результате проведенных экспериментов получены величины длины пролета пылевых частиц для различных типов питающего напряжения, уровня постоянного напряжения и частоты следования импульсов при использовании комбинированного напряжения. При использовании постоянного напряжения питания длина пролета пылевых частиц резко снижается при росте рабочего напряжения до уровня близкого к напряжению пробоя, вследствие роста напряженности электрического поля. Использование комбинированного питания позволяет снизить уровень постоянного напряжения, снизив тем самым вероятность пробоя промежутка. Также, использование комбинированного питания

длина пролета пылевых частиц может быть уменьшена повышением частоты следования импульсов напряжения при неизменном режиме работы источника постоянного напряжения. Учитывая тот факт, что мощность, потребляемая при питании постоянным напряжением, растет пропорционально кубу напряжения, использование комбинированного питания позволяет снизить удельные затраты электроэнергии на метр кубический очищаемого газа. Таким образом, применение комбинированного питания позволяет повысить эффективность очистки газов с помощью ЭФ в среднем на 30 % при одновременном снижении мощности потребляемой источником постоянного напряжения.

Список литературы. 1. Алиев Г.М.-А., Гоник А.Е. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров. – М.: Энергия, 1968. – 128 с. 2. Богуславский Л.З. Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов / Л.З. Богуславский, Л.Н. Мирошниченко, В.В. Диордийчук, Д.В. Винниченко, Н.С. Ярошинский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52 (958). – С. 31-38. 3. Богуславский Л.З. Высоковольтный высокочастотный импульсный источник питания для повышения эффективности систем газоочистки / Л.З. Богуславский, В.В. Диордийчук, Л. Н. Мирошниченко, Ю. Г. Казарян, Н. С. Ярошинский // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 99–100 4. Санаев Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами. - Семibratovo: Кондор-Эко, 2009. – 170 с. 5. Переводчиков В.И., Шапенко В.Н., Щербakov А.В., Калинин В.Г., Стученков В.М. Источники знакопеременного, импульсного и импульсно-знакопеременного питания электрофильтров // Электрические станции, 2003. – № 1. – С. 56–61. 6. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 3–9. 7. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 1. – С. 3–11. 8. Диордийчук В.В. Регулирование параметров источников импульсного и постоянного напряжений при одновременном питании электрофильтров // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 132–134.

Bibliography (transliterated): 1. Aliev G.M.-A., Gonik A.E. Jelektrooborudovanie i rezhimy pitaniya jelektrofil'trov. Moscow: Jenergija, 1968. 128. Print. 2. Boguslavskij L.Z. L.N. Miroshnichenko, V.V. Diordijchuk, D.V. Vinnichenko, N.S. Jaroshinskij "Sozdanie maketnyh obrazcov vysokovol'nogo oborudovanija kompleksnyh sistem jelektrofil'tracii jekologicheski opasnyh promyshlennyh vybrosov". Visnik NTU «HPІ». Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. 2012. No 52 (958). 31-38. Print. 3. Boguslavskij L.Z. V.V. Diordijchuk, L. N. Miroshnichenko, Ju. G. Kazarjan, N. S. Jaroshinskij "Vysokovol'nyj vysokochastotnyj impul'snyj istochnik pitaniya dlja povyshenija jeffektivnosti sistem gazoochistki" Tehn. elektrodinamika. 2012. No 2. 99–100. Print. 4. Sanaev Ju.I. Obespylivanie gazov jelektrofil'trami. Semibratovo: Kondor-Eko. 2009. 170. Print. 5. Perevodchikov V.I., Shapenko V.N., Shherbakov A.V., Kalinin V.G., Stuchenkov V.M. "Istochniki znakoperemennogo, impul'snogo i impul'sno-znakoperemennogo pitaniya jelektrofil'trov". Jelektricheskie stancii. 2003. No 1. S. 56–61. Print. 6. Shherba A.A., Suprunovskaja N.I. "Zakonomenosti povyshenija skorosti narastaniya razrjadnyh tokov v nagruzke pri ogranichenii ih maksimal'nyh znachenij". Tehn. elektrodinamika. 2012. No 5. 3–9. Print. 7. Shherba A.A., Suprunovskaja N.I. "Sintez jelektricheskikh cepej s emkostnyimi nakopiteljami jenerгии v poluprovodnikovyh formirovateljah moshhnyh razrjadnyh impul'sov" Tehn. elektrodinamika. 2014. No 1. 3–11. Print. 8. Diordijchuk V.V. "Regulirovanie parametrov istochnikov impul'snogo i postojannogo naprjazhenij pri odnovremennom pitanii jelektrofil'trov" Tehn. elektrodinamika. – 2014. No 4. 132–134. Print.

Поступила (received) 22.10.2014

Л. З. БОГУСЛАВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент, зав. отд. ИИПТ
НАН Украины, Николаев;

Л. Н. МИРОШНИЧЕНКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИИПТ
НАН Украины, Николаев;

Л. Е. ОВЧИННИКОВА, канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр., ИИПТ
НАН Украины, Николаев;

С. С. КОЗЫРЕВ, канд. техн. наук, доцент, НУК, Николаев

ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА- ЦИИ РАЗНОИМПЕДАНСНЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

Рассмотрены вопросы повышения эффективности электрофильтрации разноимпедансных газовых выбросов путем использования дополнительных импульсных источников питания с адаптивной системой управления. Адаптивная система управления с обратными связями, обеспечивает корректировку параметров импульсов генераторов в соответствии с текущим составом газовых выбросов, что дает возможность генерировать высоковольтные импульсы с параметрами, позволяющими вести эффективную деструкцию всех весомых составляющих на протяжении всего процесса обработки. Это способствует наиболее эффективному использованию энергии для деструкции каждого вида составляющих разноимпедансных газовых выбросов.

Ключевые слова: импульсные источники питания, адаптивная система управления, электрофильтрация, разноимпедансные газовые выбросы.

Введение. Наибольшее количество экологически опасных газовых выбросов приходится на долю промышленных предприятий металлургической, химической отраслей, на заводы стройматериалов, тепловые электростанции (ТЭС), которые являются источниками вредных газовых выбросов с удельным электрическим сопротивлением от 10^4 до 10^{10} Ом·м. Большинство систем электрофильтрации в Украине морально устарели. Их энергопотребление в 5-6 раз превосходит современные показатели развитых стран. При использовании высокозольного топлива (бурый уголь) появляются проблемы с осаждением высокоомных пылевых частиц, а также с деструкцией экологически опасных газовых выбросов. Поэтому работы по повышению эффективности электрофильтрации разноимпедансных газовых выбросов с использованием дополнительных управляемых импульсных источников питания являются актуальными.

Анализ предварительных исследований. Для обеспечения европейских норм газовых выбросов в условиях использования на ТЭС бурого угля в ИИПТ НАН Украины был разработан способ повышения эффективности работы существующих электрофильтров (ЭФ) с применением дополнительных

импульсных высокочастотных источников питания, формирующих специальные формы напряжения, обеспечивающие как дозарядку разноимпеданной пыли, так и эффективную деструкцию экологически опасных газовых выбросов путем использования стабильных стримерных разрядов в разноимпедансных газовых средах [1].

Наличие в газовых выбросах разноимпеданной пыли обуславливает необходимость корректировать основные параметры импульсов (мощность, длительность, крутизна, частота следования) в соответствии с составом и весовыми долями газовых выбросов. Применяемые в системах электрофильтрации дополнительные импульсные высокочастотные источники питания не имеют возможности текущего управления параметрами импульсов в процессе электрофильтрации, что существенно снижает их эффективность.

Целью работы является повышение эффективности систем электрофильтрации разноимпедансных газовых выбросов с помощью импульсных источников питания с адаптивными системами управления, позволяющими варьировать параметры импульса в процессе электрофильтрации и деструкции экологически опасных составляющих в зависимости от текущего состава и весовых долей газовых выбросов.

Материалы исследований. Комплексные системы электрофильтрации разноимпедансных экологически опасных газовых выбросов должны обеспечить решение с помощью дополнительных управляемых импульсных источников питания ряда ключевых вопросов, основными из которых являются осаждение высокоомных пылей и деструкция экологически опасных газовых выбросов. Для решения этих вопросов необходимо рассмотреть особенности процесса электрофильтрации разноимпедансных газовых выбросов, предложить способы повышения эффективности деструкции экологически опасных газовых составляющих, разработать адаптивные системы управления импульсными источниками питания для реализации этих способов.

Эффективность электрофильтра зависит от мощности, передаваемой в электрофильтр. Анализ зависимости эффективности улавливания летучей золы электрофильтром от переданной мощности показал, что эффективность улавливания золы выше 99 % возможно при увеличении удельной мощности короны до 300 Вт/с/м³. Таким образом, для повышения эффективности воздействия стримерного разряда на дымовые выбросы необходимо увеличивать передачу энергии в плазму. Следствием этого должно быть увеличение количества стримеров в межэлектродном промежутке электрофильтра, что в свою очередь должно привести к увеличению эффективности удаления аэрозольных частиц и уменьшению объема экологически опасных газов, выбрасываемых в атмосферу [2].

Первые опыты по применению метода импульсного питания показали, что запыленность на выходе из электрофильтра снижается в 1,5...1,6 раза, а мощность, потребляемая электрофильтром, в 20 раз [3]. При импульсном пи-

тании электрофильтров электрическая прочность воздушных промежутков выше их электрической прочности при постоянном напряжении, что позволяет увеличить амплитудное значение напряжения и получить больший удельный заряд пыли.

Как показали исследования, эффективность пылеулавливания на стандартных системах газоочистки падает в два раза при повышении удельного сопротивления золы от 10^6 до 10^{10} Ом·м. Для электрофильтрации высокоомной пыли необходимо сокращать фронт импульса, изменять длину импульсов и частоту их следования. Более того, для повышения эффективности электрофильтрации эти изменения необходимо согласовывать с текущим составом газовых выбросов, что требует адаптивного управления.

Проведенные в ИИПТ НАН Украины теоретические и экспериментальные исследования, в основу которых положен научный опыт исследований института в области теории импульсных процессов и преобразования энергии при коронном и объемном разрядах в конденсированных средах, создания импульсных источников энергии высокой плотности и систем управления ими, позволили создать специальный класс оборудования, обеспечивающего формирование высоковольтных высокочастотных импульсов с частотой следования до 10 кГц, напряжением до 100 кВ, крутизной фронта до сотен наносекунд. Такие параметры импульсов обеспечивают создание стримерных коронных и объемных разрядов в высокоомных газовых средах, необходимых для модернизации технологии очистки разноимпедансных газовых выбросов экологически опасных промышленных объектов.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования условий формирования стримерных коронных и объемных разрядов позволили сформулировать ряд условий, обязательных для формирования и поддержки таких разрядов. Так, для их формирования, в зависимости от состава пыли, необходим импульс с крутизной от микросекундного до наносекундного фронта. Для обеспечения эффективной дозарядки пыли длительность высоковольтных импульсов должна соответствовать ее электрическим параметрам (обычно это десятки-сотни микросекунд). Частота следования разрядных импульсов должна находиться в диапазоне от единиц до десятков килогерц - это условие обеспечения стабильного разряда при изменении характеристик среды в процессе работы устройства в значительном объеме обрабатываемого объекта [4].

Как отмечалось выше, наличие в газовых выбросах разноимпедансной пыли обуславливает необходимость корректировать в процессе очистки основные параметры импульсов (длительность, крутизна, частота следования) в соответствии с составом и весовыми долями газовых выбросов.

Суть предлагаемого способа деструкции разноимпедансных газовых выбросов экологически опасных промышленных объектов заключается в следующем: объемный разряд образуется в разноимпедансной газовой среде при подаче на многоострийную электродную систему по заданному алгоритму высоковольтных высокочастотных импульсов с коротким фронтом от им-

пульсных источников питания с длительностью и частотой следования импульсов, необходимыми для деструкции каждой из значимых разноимпедансных составляющих газовых выбросов [5]. Определить составляющие газовых выбросов можно предварительно согласно атласу пылей, либо используя непосредственный анализ структуры конкретной газовой смеси. В объеме опасных разноимпедансных выбросов определяют количество и весовой коэффициент наиболее значимых составляющих газовых выбросов, и в соответствии с этим определяется необходимый алгоритм работы импульсной системы питания, обеспечиваемый адаптивной системой управления. Подача высоковольтных высокочастотных импульсов, необходимых для деструкции разноимпедансной газовой смеси, осуществляется от импульсных источников, количество и длительность импульсов которых соответствуют количеству и величине долей весомых составляющих газовых выбросов.

Блок-схема импульсной системы питания с адаптивным управлением для электрофильтрации разноимпедансных газовых выбросов приведена на рис. 1. Импульсная система питания состоит из нескольких генераторов высоковольтных импульсов 1 (Г1-ГN), количество которых зависит от прогнозируемого состава газовых выбросов, которые работают на электрофильтр 2, являющийся общей нагрузкой для генераторов в виде многоостриевой электродной системы, которая разделена на n секций соответственно количеству генераторов. Общая адаптивная система управления 3 (ОАСУ) подает управляющие сигналы на индивидуальные системы управления 4 (СУ1-СУN) генераторов 1 и имеет обратную связь с анализаторами 5 электрофильтра (нагрузки) 2. Генераторы высоковольтных импульсов 1 имеют в своем составе источник питания 6, регулятор напряжения 7, формирователь импульсов 8, высоковольтный импульсный трансформатор 9. Индивидуальные системы управления 4 генераторов 1 подают управляющие сигналы на регуляторы напряжения 7 и формирователи импульсов 8 соответствующих генераторов, а на них поступают сигналы обратной связи с источников питания 6, регуляторов напряжения 7, формирователей импульсов 8 и датчиков тока 10 (ДТ).

Электрофильтр (нагрузка) представляет собой многоостриевую электродную систему, разделенную на n секций, через которые проходят газовые выбросы, деструкцию которых обеспечивает коронный объемный разряд, возникающий в межэлектродном пространстве, и имеет в своем составе два анализатора газовых выбросов 5, расположенных на входе и выходе.

Общая адаптивная система управления 3 подает управляющие сигналы 11 на индивидуальные системы управления 4 генераторов 1 и получает сигналы обратной связи 12 с анализаторов 5 и сигналы обратной связи 13 из индивидуальных систем управления 4 генераторов 1.

Наличие обратных связей обеспечивает коррекцию длины и частоты прохождения высоковольтных импульсов соответственно текущему составу газовых выбросов и дает возможность вести эффективную деструкцию всех составляющих газовых выбросов на протяжении всего процесса обработки.

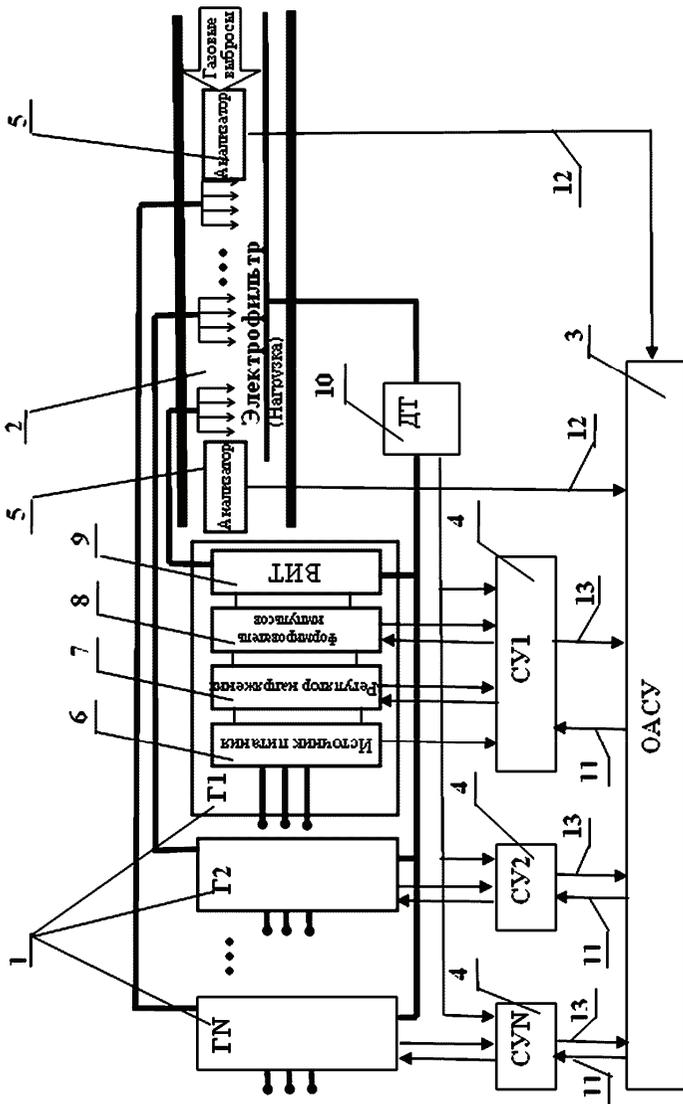


Рисунок 1 – Блок-схема импульсной системы питания с адаптивным управлением для электрофильтрации разноимпедансных газовых выбросов

Система импульсного электропитания электрофильтров с адаптивным управлением для очистки разноимпедансных газовых выбросов работает следующим образом. Общая адаптивная система управления 3 предварительно получает с анализаторов 5 по каналам связи 12 информацию о количестве весомых составляющих, которые имеют разные импедансы, в общем объеме разноимпедансных газовых выбросов, и по установленному алгоритму подключает необходимое количество генераторов высоковольтных импульсов 1, равняющееся количеству обнаруженных анализаторами весомых составляющих разноимпедансных газовых выбросов. Затем путем подачи необходимых управляющих сигналов на индивидуальные системы управления 4 генераторов 1 обеспечивается генерирование высоковольтных импульсов с параметрами (частота следования, форма импульса), которые необходимы для деструкции обнаруженных анализаторами 5 весомых составляющих разноимпедансных газовых выбросов. Значение параметров импульсов, необходимых для деструкции различных составляющих газовых выбросов, определяются в процессе предварительных исследований и заносятся в базу знаний общей адаптивной системы управления.

В процессе работы происходит деструкция весомых составляющих, соответственно изменяется текущий состав газовых выбросов. Благодаря наличию обратной связи 12, от анализаторов 5 в общую адаптивную систему управления 3 поступают сигналы, которые обрабатываются в соответствии с заложенным алгоритмом. При этом общая адаптивная система управления 3 генерирует управляющие сигналы, которые подаются в индивидуальные системы управления 4 генераторов 1 и корректируют длину и частоту высоковольтных импульсов в соответствии с текущим составом газовых выбросов.

Общая адаптивная система управления может реализовывать несколько алгоритмов работы в зависимости от исходных данных. Библиотека алгоритмов загружается в базу знаний и при поступлении информации в базу данных вызывается необходимый алгоритм. В процессе работы по обратным связям поступает информация о текущем состоянии объекта обработки (состав газовых выбросов) и происходит корректировка параметров высоковольтных импульсов генерируемых дополнительными импульсными источниками питания, а при необходимости и алгоритмов работы общей системы управления. Возможность корректировки параметров генерируемых импульсов позволяет обеспечить их оптимальные параметры для осаждения и деструкции всех весомых составляющих газовых выбросов, что позволяет вести эффективную деструкцию всех составляющих газовых выбросов на протяжении всего процесса обработки при минимальных затратах энергии.

Выводы. В результате проведенных исследований создана импульсная система питания для электрофильтрации с дополнительными импульсными источниками питания и общей адаптивной системой управления. Благодаря наличию адаптивной системы управления с обратными связями, обеспечива-

ється коректировка параметров імпульсов всіх генераторов в соответствии с текущим составом газовых выбросов, что дает возможность генерировать высоковольтные импульсы с параметрами, позволяющими вести эффективную деструкцию всех весомых составляющих на протяжении всего процесса обработки, что способствует наиболее эффективному использованию энергии для деструкции каждого вида составляющих разноимпедансных газовых выбросов.

Список литературы. 1. Пат. 90293 Украина, МПК (2014) B01D 53/32 (2006.01) C10K 1/00 Н1Т 19/00. Спосіб деструкції різноімпедансних газових викидів небезпечних промислових об'єктів / Богуславський Л. З., Мирошніченко Л. М., Діордійчук В. В.; заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № у 2013 11731; заявл. 04.10.2013; опубл. 26.05.14. Бюл. № 10. 2. *Богуславский Л. З.* Влияние режимов работы высоковольтного источника питания на формирование стримерного коронного разряда и эффективность систем газоочистки / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, Ю. Г. Казарян, Н. С. Ярошинский // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силовая електроніка та енергоефективність. – 2011. – Ч. 1. – С. 44-49. 3. *Богуславский Л. З.* Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, В. В. Диордійчук, Д. В. Винниченко, Н. С. Ярошинский // Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – № 52 (958). – С. 31-39. 4. *Богуславский Л. З.* Электрофильтрация разноимпедансных газовых выбросов в комплексной системе пылегазоочистки экологически опасных промышленных объектов / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – № 21. – С. 12-16. 5. Заявка № у 2014 07889 Україна, МПК (2014.01) H03K3/53 B01D 53/32 C10K1/00 Система імпульсного електроживлення електрофільтрів для очищення різноімпедансних газових викидів / Богуславський Л. З., Мирошніченко Л. М., Овчиннікова Л. Є. Заявлено 14.07.2014.

Bibliography (transliterated): 1. Pat. 90293 Ukrayna, МПК (2014) B01D 53/32 (2006.01) C10K 1/00 Н1Т 19/00. Sposib destruktiviyi riznoimpedansnykh hazovykh vykydiv nebezpechnykh promyslovykh ob'yektiv. Bohuslavskyy L. Z., Myroshnychenko L. M., Diordiychuk V. V.; zayavnyk ta patentovlasnyk Instytut impulsnykh protsesiv i tekhnolohiy NAN Ukrayny. – № у 2013 11731; zayavl. 04.10.2013; opubl. 26.05.14. Бюл. № 10. Print. 2. Boguslavskij, L. Z., et all. Vlijanie rezhimov raboty vysokovoltного istochnika pitaniya na formirovanie strimerного koronного razrjada i effektivnost sistem gazoочistki. Tehn. elektrodinamika. Tem. vyp. Sylova elektronika ta energotfektyvnost. - 2011. 44-49 P. Print. 3. Boguslavskij, L. Z., et all. Sozdanіe maketnyh obrazcov vysokovoltного oborudovaniya kompleksnyh sistem elektrofiltracii ekologicheski opasnyh promyshlennyh vybrosov. Vestn. Khar'k. politehn. in-ta, № 52 (958), 2012. 31-39 P. Print. 4. Bohuslavskyy L. Z. Elektrofil'tratsyya raznoimpedansnykh hazovykh vybrosov v kompleksnoy systeme pyl'egazoочystky ekologicheskoy opasnykh promyshlennykh ob'yektiv. L. Z. Bohuslavskyy, L. N. Myroshnychenko. Vestn. Khar'k. politehn. in-ta, № 21, 2014. 12-16 P. Print. 5. Zayavka № у 2014 07889 Ukrayna, МПК (2014.01) H03K3/53 B01D 53/32 C10K1/00 Systema impulsnoho elektrozhivlennya elektrofil'triv dlya ochyshchennya riznoimpedansnykh hazovykh vykydiv. Bohuslavskyy L. Z., Myroshnychenko L. M., Ovchynnikova L. Ye. Zayavleno 14.07.2014. Print.

Поступила (received) 03.10.2014

Е. М. ВАСИЛЬЕВА, нач. лаборатории ННЦ, «Институт метрологии», Харьков

С. А. ВИННИЧЕНКО, инженер 2 кат., ННЦ «Институт метрологии», Харьков

С. Г. БОНДАРЬ, вед. инженер, ННЦ «Институт метрологии», Харьков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ АНТЕНН В ТЕМ-КАМЕРЕ

Рассмотрена возможность использования ТЕМ-камеры для калибровки различных типов антенн, включая измерительные. Приведены ограничения, обусловленные конструкцией ТЕМ-камеры, и аппаратурный состав комплекса измерений. Определены направления работ для расширения функциональных возможностей комплекса в части расширения аппаратурного состава и проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: ТЕМ-камера, электромагнитное поле, калибровка антенн, электромагнитная совместимость.

Введение. Измерительные антенны имеют нормированные с заданной погрешностью характеристики, что позволяет использовать их как метрологическое средство при измерениях различных параметров антенн, напряженности поля и помех, оценки качества сигналов совместно с приемниками или анализаторами спектра в составе мониторинговых систем.

Измерение параметров антенн с высокой точностью представляет собой сложную техническую задачу, требующую создания испытательной площадки, оснащенной дорогостоящим испытательным оборудованием. Учитывая наличие в ННЦ «Институт метрологии» ТЕМ-камеры для проведения испытаний на электромагнитную совместимость и актуальность задачи измерения параметров антенн, целесообразно рассмотреть условия, при которых возможно корректное измерение параметров антенн с ее помощью без существенных экономических затрат.

Целью статьи является анализ ограничений, обусловленных конструкцией ТЕМ-камеры, при измерении параметров антенн и определение направлений работ для расширения функциональных возможностей измерительного комплекса.

Основная часть.

Коэффициент калибровки антенн. Коэффициент калибровки антенны описывает соотношение между напряженностью электрического поля и на-

пряжения на выходе испытываемой антенны (50 Ом). Поскольку напряженность поля можно определить только косвенно, исходя из измеренного напряжения на выходе антенны, для преобразования напряжения в напряженность поля нужно применить подходящий коэффициент преобразования, т. е. коэффициент калибровки антенны или антенный фактор:

$$K = E/V, \quad (1)$$

где K – антенный фактор; E – напряженность электрического поля; V – напряжение на выходе антенны (50 Ом).

Взаимодействие между антенной и ее окружающей средой осложняет измерения. Для решения этой задачи антенный фактор в свободном пространстве определяется для идеальных условий, т.е. без влияния внешней окружающей среды, а измерения проводятся в особых условиях, где внешние влияния теоретически можно рассчитать. Такие условия существуют, например, над идеальной кондуктивной поверхностью в ТЕМ-камере. что позволяет скорректировать полученные результаты измерений с учетом систематических эффектов среды.

ТЕМ-камера. Конструктивно ТЕМ-камера представляет собой сужающуюся коаксиальную линию (смещенную мембранную пластину) с оконечными устройствами в виде комбинации дискретных резисторов и радиочастотных поглотителей для обеспечения согласования в широкой полосе частот (рис. 1). В камере генерируется поперечная электромагнитная волна, точна такая, которая наблюдается в свободном пространстве.



Рисунок 1 – ГТЕМ-камера фирмы TESEQ

При правильном расположении облучающей антенны вблизи вершины

рупорной камеры фазы прямого луча и лучей, отраженных от пирамидальной части поверхности камеры, различаются незначительно. При этом образуется медленно меняющаяся пространственная интерференционная картина, которая характеризуется плавным изменением амплитуды поля в рабочей зоне.

ТЕМ-камеры предназначены для испытаний на электромагнитную совместимость (ЭМС), калибровки антенн и зондов для измерения напряженности поля, испытаний и измерения характеристик мобильных телефонов, а также для измерения экранирующих и поглощающих способностей материалов, при этом стоимость таких испытаний значительно ниже, чем при использовании открытых площадок или безэховых камер прямоугольной формы.

В данных камерах есть возможность создания высокостабильных, однородных электромагнитных полей, которые идеально подходят для калибровки антенн и датчиков напряженности электрического и магнитного полей. Допустимое изменение поля в камере менее 1 dB на 30 см³. Неоднородность поля в камере на прямую влияет на увеличения неопределенности результатов измерения.

ТЕМ-камеры позволяют измерять электродинамические параметры антенных систем: зеркальных антенн всевозможных типов и видов, антенных решеток, одиночных антенн, облучателей, излучателей и т.д., как с линейной, так и с круговой поляризацией. Рупорные камеры могут быть эффективно использованы для проведения большинства антенных измерений. При этом габариты камеры накладывают определенное ограничение на направленность испытываемых антенных систем.

Благодаря созданию в рупорных камерах стабильных электромагнитных, механических, и климатических условий, измерения и испытания ТС могут быть легко автоматизированы. ТЕМ- камера, которая показана на рисунке 1. находится в НЦ-5 ННЦ «Институт метрологии». Семиметровая камера TESEQ GTEM 1500 позволяет проводить испытания ТС на ЭМС, в диапазоне частот от нуля до 20 ГГц. Данная камера входит в автоматизированную систему под управлением ПО R&S[®]EMC32, разработки фирмы Rohde & Schwarz. Основу системы составляет самое современное оборудование производства фирм Rohde & Schwarz, TESEQ (бывшая Schaffner), BONN Elektronik, RF/Microwave Instrumentation, MATURO.

Автоматизированная система под управлением ПО R&S[®]EMC32 позволяет проводить испытания в соответствии с требованиями следующих стандартов ЭМС (основных в данной области): ДСТУ CISPR 16-2:2005; ДСТУ CISPR 22:2007; IEC 61000-4-20:2007; ДСТУ IEC 61000-4-3:2007; ДСТУ IEC 61000-4-6:2007.. Перечень оборудования испытательного стенда приведен в табл. 1.

Наличие в составе стенда антенн с известными характеристиками позволяет проводить измерения путем сравнения характеристик испытываемой и штатной антенны.

Таблица 1 – Перечень оборудования испытательного стенда

№ п/п	Наименование	Тип	Метрологические характеристики
1	Генератор сигналов	R&S® SMC100A	От 9 кГц до 3,2 ГГц $\Delta_f = 5 \cdot 10^{-5}$
2	Тестовый приемник	R&S® ESCI	От 9 кГц до 3,2 ГГц $\Delta_a = 0,3\%$
3	Зонд электрического поля	FL7006	От 100 кГц до 6 ГГц $\delta_p = 5 \cdot 10^{-2}$
4	Датчики мощности	R&S® NRP-Z91	От 9 кГц до 3,2 ГГц $\delta_\beta = 1 \cdot 10^{-2}$
5	Билагориформическая антенна	TESEQ CBL 6112D	От 9 кГц до 3,2 ГГц $\delta_0 = 2,4 \cdot 10^{-2}$
6	Штыревая антенна	R&S® HFH2-Z1	От 9 кГц до 30 МГц
7	Испытательная камера	TESEQ GTEM 1500	От 0 до 20 ГГц
8	Усилитель мощности	BLWA0830-100/80D	От 80 МГц до 3 ГГц 100 Вт
	Генератор сигналов	R&S® SMF100A	От 1 ГГц до 43 ГГц
	Измерительный приемник	R&S® FFSMR43	От 1 ГГц до 43 ГГц
	Усилитель мощности	BSA 0101-100D	От 10 кГц до 1 ГГц
	Усилитель мощности	BONN BLMA 2060-50	От 2 ГГц до 6 ГГц

Возможности НЦ-5 в части проведения измерений в ТЕМ-камере ограничиваются диапазоном частот 10 кГц – 6000 МГц и охватывают большинство задач испытаний на ЭМС. Особо следует отметить существование в диапазоне частот 80-3000 МГц большого и перспективного сегмента медицинских аппаратов (например, УВЧ - терапии), которые требуют проверки при напряженности электромагнитного поля до 120 В/м и уровнях входного сигнала до 50 Вт. Такого рода измерения являются уникальными и частично реализуются в Укрметрестандарте г. Киев.

Для обеспечения проведения испытаний в диапазоне частот до 18 ГГц при напряженности электромагнитного поля до 20 В/м аппаратуру стенда необходимо дополнить усилителем мощности BLMA 4018-30D. В настоящее время такого рода испытания с напряженностями поля до 2 В/м возможны на рабочем месте с использованием имеющихся генераторов и технологических рупорных антенн.

Поверка и калибровка антенн. В НЦ-5 на базе приведенной выше аппаратуры создано рабочее место для проведения поверки и калибровки различного типа антенн и измерителей уровней электромагнитного поля. Анализ характеристик аппаратуры и методов измерений дает значение абсолютной погрешности измерения калибровочного коэффициента антенн не более ± 1 дБ, значение неопределенности при калибровке не превышает 1,6 дБ.

На данном рабочем месте регулярно проходят поверка и калибровка антенн типа HE300, HF906, рупорных антенн комплексов радиомониторинга ССТК и др.

Направления исследовательских работ. Для уточнения значений погрешности измерений параметров антенн в ТЕМ-камере необходимо дополнительно провести ряд теоретических и экспериментальных исследований, а именно:

- провести анализ характеристик распределения электромагнитного поля в ТЕМ-камере
- определить максимальные габаритные размеры исследовательских объектов, не влияющих на распределение электромагнитного поля в камере
- осуществить экспериментальное подтверждение результатов анализа.

Задачи изучения излучения и рассеяния электромагнитных волн состоят в необходимости определения поля в области больших электрических размеров (под электрическим размером понимается отношение геометрического размера к длине волны в свободном пространстве). Особое значение при этом приобретает правильный выбор программы моделирования, т.к. дискретизация больших областей порождает задачи огромной размерности. В этом случае строгие методы электродинамики необходимо дополнить, так называемыми, асимптотическими методами: физической оптики (ФО), геометрической теории дифракции (ГТД) и т.д.

Выводы. Рассмотрена возможность использования ТЕМ-камеры для калибровки различных типов антенн, включая измерительные. Приведены ограничения, обусловленные конструкцией ТЕМ-камеры, и аппаратный состав комплекса измерений. Определены направления работ для расширения функциональных возможностей комплекса в части расширения аппаратного состава и проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Список литературы. 1. Juergen Gassner, Rohde&Schwarz Високоточная калибровка измерительных антенн – теперь как услуга // Chip news Украина. – № 08 (98), октябрь 2010. **2.** ГОСТ 8.309-78 ГСИ. Антенны остронаправленные. Методика выполнения измерений для определения параметров по полю в раскрыве. **3.** ГОСТ 8.363-79. ГСИ. Антенны измерительные рамочные. Методы и средства поверки. **4.** ДСТУ ГОСТ 8.191:2009. ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений параметров поля излучения антенных систем с рабочими размерами раскрывов от 0,1 до 0,4 м в диапазоне частот 2,5...12 ГГц. **5.** Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. – М.: ЗАО НПП «РОДНИК», 2008. – 246 с.

Bibliography (transliterated): 1. Juergen Gassner, Rohde&Schwarz. Vysokotochnaja kalibrovka izmeritel'nyh antenn – teper' kak usluga. Chip news Ukraina, #08(98), oktjabr' 2010. **Print. 2.** GOST 8.309-78 GSI. Antenny ostronapravlennye. Metodika vypolnenija izmerenij dlja opredelenija parametrov po polju v raskryve. **Print. 3.** GOST 8.363-79. GSI. Antenny izmeritel'nye ramochnye. Metody i sredstva poverki. **Print. 4.** DSTU GOST 8.191:2009. GSI. Gosudarstvennyj special'nyj jetalon i obshhesojuznaja poverochnaja shema dlja sredstv zmerenij parametrov polja izlucheniya antennnyh sistem s rabochimi razmerami raskryvov ot 0,1 do 0,4 m v diapazone chastot 2,5...12 GGc. **Print. 5.** Bankov S.E., Kurushin A.A. Raschet izluchaemyh struktur s pomoshh'ju FEKO – M., ZAO «NPP «RODNIK», 2008, 246 s. **Print.**

Поступила (received) 14.10.2014

В.И. ГУНЬКО, зав. сектором, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
А.Я. ДМИТРИШИН, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;
А.П. МАЛЮШЕВСКАЯ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИИПТ НАН
Украины, Николаев;
С.О. ТОПОРОВ, вед. инженер, ИИПТ НАН Украины, Николаев

ВЛИЯНИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ И ОЧИСТКИ ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПЛЕНОЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Рассмотрен вопрос об отказе от очистки и стабилизации жидкого диэлектрика для пропитки высоковольтных импульсных конденсаторов и влиянии этого фактора на электрическую прочность рабочего диэлектрика и ресурс конденсатора. Исследования по определению кратковременной электрической прочности и ресурса секций на основе комбинированных пленочных диэлектрических структур различной толщины показали, что кратковременная электрическая прочность систем с неочищенным пропитывающим диэлектриком практически не изменяется, а средний ожидаемый ресурс уменьшается от 2 до 4 раз.

Ключевые слова: высоковольтный импульсный конденсатор, жидкий пропитывающий диэлектрик, электрическая прочность, ожидаемый ресурс.

Введение. В результате ряда проведенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ИИПТ НАН Украины создана большая номенклатура высоковольтных импульсных конденсаторов на основе пленочного диэлектрика, пропитанного маловязкой диэлектрической жидкостью. О преимуществах пленочного диэлектрика по сравнению с применяемыми ранее в конструкциях высоковольтных импульсных конденсаторов с бумажным и комбинированным бумажно-пленочным диэлектриками было сказано ранее в [1-4], однако в данной работе рассматриваются отдельные вопросы, связанные технологией изготовления высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком.

Известно, что долговечность высоковольтных импульсных конденсаторов в основном определяется технологией их изготовления, при этом технология изготовления конденсаторов с пленочным диэлектриком кардинально отличается от технологии изготовления конденсаторов с бумажным и комбинированным бумажно-пленочным диэлектриками [3-5]. Однако и здесь возможны некоторые отступления от правил. Так, в [6, 7] получены удовлетворяющие авторов результаты при пропитке пленочного диэлектрика конденсаторов без его предварительной сушки, что стало возможным по причине отсутствия бумажного диэлектрика, являющегося основным концентратором

© В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, А.П. Малюшевская, С.О. Топоров, 2014

влаги. Такая технология изготовления конденсаторов является вынужденной в условиях необходимости быстрого их изготовления в больших количествах, когда долговечность конденсаторов определяется длительной электрической прочностью пленочного диэлектрика [6].

В ИИПТ НАН Украины при создании различных типов высоковольтных импульсных конденсаторов разработаны оригинальные технологии пропитки пленочного диэлектрика маловязкими диэлектрическими жидкостями. Товарные жидкие диэлектрики (т.е. электроизоляционные жидкости в состоянии поставки) содержат микрочастицы в количествах до 10^6 част./см³, 94 % которых обычно представляют собой волокна целлюлозы и углеродные частицы, а остальные – металлы (железо, алюминий и т.д.) и песчинки, возможны также и различные химические включения [8]. Эти частицы попадают в жидкий диэлектрик при его изготовлении, транспортировании или хранении, причем механические примеси достигают размера 10 мкм, что уже сравнимо с толщинами полимерных пленок, входящих в конструкцию конденсаторного диэлектрика, и этот факт потребовал создания технологии очистки и стабилизации применяемых жидких диэлектриков адсорбентами [9-11]. Процесс очистки и стабилизации занимает определенное время и ведет к увеличению общей продолжительности изготовления высоковольтных импульсных конденсаторов.

Цель данной работы – оценка возможности отказа от очистки и стабилизации товарного диэлектрика адсорбентом и прогнозирование при этом ожидаемого среднего ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с различными конструкциями пленочного диэлектрика.

Основная часть. Для достижения поставленной цели проводились экспериментальные исследования на макетах секций с тремя конструкциями трехслойного полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика толщиной d , равной 30, 34 и 39 мкм, пропитанного трансформаторным маслом Т-1500. Данные пленочные диэлектрические системы выбраны как наиболее широко применяемые в конструкциях создаваемых ИИПТ высоковольтных импульсных конденсаторов [12]. Для изготовления макетов секций брались материалы одной и той же партии поставки, изготавливались две партии секций одинакового количества, с одинаковыми геометрическими размерами и с одним и тем же количеством рабочих витков. При этом одна партия макетов секций пропитывалась товарным трансформаторным маслом, а другая партия – трансформаторным маслом, прошедшим очистку и стабилизацию адсорбентом. Причем все макеты секций проходили полный цикл термовакуумной сушки и пропитки, разработанной специально для высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком [13].

Трансформаторное масло Т-1500 очищалось способом перколяции, а в качестве адсорбента бралась окись алюминия. Перед очисткой окись алюми-

ния активировалась прокаливанием при температуре от 450 до 500 °С и остывала в закрытом объеме до температуры окружающей среды, а трансформаторное масло нагревалось до температуры от 40 до 45 °С.

Для оценки возможности применения для пропитки высоковольтных импульсных конденсаторов товарного трансформаторного масла определялись величины кратковременной и длительной электрической прочности пленочных диэлектрических систем. Кратковременная электрическая прочность $E_{пр.кр}$ определялась путем доведения макетов секций до электрического пробоя, определение длительной электрической прочности (ресурса $N_{ср}$) проводилось в режиме колебательного разряда с рабочим напряжением 6 кВ, амплитудой разрядного тока через секцию 0,5 кА, декрементом колебания разрядного напряжения 10 и частотой следования зарядов-разрядов 0,2 Гц.

Результаты испытаний макетов секций приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний макетов секций на электрическую прочность

d , мкм	E_p , кВ/мм	Товарная жидкость				Стабилизированная жидкость			
		$E_{пр.кр.}$, кВ/мм	Коэфф. вариации, %	$N_{ср}$, зарядов- разрядов	Коэфф. вариации, %	$E_{пр.кр.}$, кВ/мм	Коэфф. вариации, %	$N_{ср}$, зарядов- разрядов	Коэфф. вариации, %
30	200,0	420,0	4,7	$1,46 \cdot 10^5$	7,1	433,3	4,6	$3,38 \cdot 10^5$	6,3
34	183,8	423,5	2,3	$1,61 \cdot 10^5$	5,5	418,2	2,5	$5,30 \cdot 10^5$	5,1
39	153,8	379,5	2,7	$2,75 \cdot 10^5$	7,3	388,3	2,3	$1,20 \cdot 10^6$	6,2

Анализируя результаты испытаний макетов секций, видно, что средняя кратковременная электрическая прочность диэлектрических систем с использованием очищенного и стабилизированного трансформаторного масла Т-1500 отличается от средней кратковременной электрической прочности тех же диэлектрических систем с товарным трансформаторным маслом Т-1500 в пределах статистической погрешности. При этом необходимо отметить, что и различие в коэффициентах вариации величин средней кратковременной электрической прочности диэлектрических систем с товарным трансформаторным маслом несущественно по сравнению с теми же диэлектрическими системами, но уже на основе очищенной и стабилизированной жидкости.

Различие по величинам средней длительной электрической прочности этих диэлектрических систем уже более заметно и составляет от 2 до 4 раз. Однако при этом и коэффициенты вариации величин средней длительной электрической прочности диэлектрических систем с товарным трансформаторным маслом несколько больше, чем у тех же диэлектрических систем, но уже на основе очищенной и стабилизированной жидкости.

Указанное снижение ресурса должно быть обязательно учтено при прогнозировании ожидаемого среднего ресурса высоковольтного импульсного конденсатора в случае применения товарного жидкого диэлектрика и может быть оправдано значительным уменьшением времени изготовления конден-

саторов и трудоемкости процесса производства.

Вместе с тем согласно [14] на величину ожидаемого среднего ресурса конденсатора помимо технологии его изготовления оказывает значительное влияние и режим эксплуатации конденсатора. Для более точной оценки ресурса конденсатора, пропитанного товарным жидким диэлектриком, необходимы дополнительные исследования по определению эмпирических коэффициентов в известных формулах, характеризующих зависимость ресурса от режима эксплуатации.

Выводы. 1. Величина кратковременной электрической прочности пропитанных диэлектрических систем не может служить критерием необходимости очистки и стабилизации товарных жидких пропитывающих диэлектриков.

2. В случае применения для пропитки конденсаторного диэлектрика товарного трансформаторного масла Т-1500 величина ожидаемого среднего ресурса высоковольтного импульсного конденсатора должна быть уменьшена от 2 до 4 раз в зависимости от конструкции его диэлектрической системы.

Список литературы: 1. *Кучинский Г.С., Назаров Н.И.* Силовые электрические конденсаторы. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 310 с. 2. *Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Швец И.С.* О повышении удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов // *Электронная обработка материалов*. – 2004. – №5. – С. 70-73. 3. *Ермилов И.В.* Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией // *Электричество*. – 2006. – № 9. – С. 73-79. 4. *Рудаков В.В.* Стан та тенденції розвитку високовольтних імпульсних конденсаторів // *Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр.: Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 146-154. 5. *Варшавский Д.С.* Силовые конденсаторы / Под ред. Б.М. Тареева. – М.: ВИНТИ, 1980. – 128 с. 6. *Бутко М.В., Бутко С.М., Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В., Сеиридок С.Н.* Электрические характеристики изоляции импульсных конденсаторов, включающих слои полипропиленовой пленки толщиной 40 мкм // *Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр.: Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – № 49. – С. 47-53. 7. *Рудаков В.В., Касаткин В.П.* Удельная энергия высоковольтных импульсных конденсаторов с лавсановым диэлектриком // *Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр.: Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 21. – С. 233-237. 8. *Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Коричко и др. Т.1.* – 3-е изд. перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 386 с. 9. Пат. 20693 Украина. МПК (2006) H01G 4/018 Способ очистки жидких диэлектриков, преимущественно полиметилсилоксановой жидкости ПМС-10 / *Онищенко Л.И., Гунько В.И., Гребенников И.Ю., Дмитришин А.Я., Фецук Т.А.*; заявитель и патентообладатель ИИПТ НАН Украины. - № u200607336; заявл. 03.07.06; опубл. 15.02.07, Бюл. № 2. – 4 с. 10. Пат. 25993 Украина. МПК (2006) H01G 4/018 Способ очистки ароматических углеводородных масел, преимущественно фенилсилилэтана. / *Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Топоров С.О., Фецук Т.А.*; заявитель и патентообладатель ИИПТ НАН Украины. – № u200705244; заявл. 14.05.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. – 4 с. 11. Пат. 25595 Украина. МПК (2006) H01G 4/018 Способ очистки нефтяных трансформаторных масел, преимущественно масла Т-1500. / *Онищенко Л.И., Гунько В.И., Гребенников И.Ю., Дмитришин А.Я., Фецук Т.А.*; заявитель и патентообладатель ИИПТ НАН Украины. – № u200704319; заявл. 19.04.07; опубл. 10.08.07, Бюл. № 12. – 4 с. 12. *Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Топоров С.О., Фецук Т.А.* Исследования конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов // *Электронная обработка материалов*. – 2012. – № 2. – С. 93-96. 13. Пат. 57999 Украина. МПК (2011.01) H01G 13/04 Способ пропитки электрических конденсаторов с пленочным диэлектриком. / *Гунько*

В.И., Гребенников И.Ю., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Топоров С.О.; заявитель и патентообладатель ИИПТ НАН Украины. - № u201010500; заявл. 30.08.10; опубл. 25.03.11, Бюл. № 6. - 4 с. **14.** *Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Михайлов И.Г., Онищенко Л.И., Фещук Т.А.* Исследование зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком от режимов эксплуатации // *Электротехника*. - 2006. - №6. - С. 36-41.

Bibliography (transliterated): **1.** Kuchinskii G.S., Nazarov N.I. Silovye elektricheskie kondensatory - Izd. 2-e, pererab. i dop. - Moscow: Energoatomizdat, 1992. Print. **2.** Grebennikov I.Yu., Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ya., Onischenko L.I., Shvec I.S. «O povyshenii udel'nyh energeticheskikh karakteristik i resursa vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov» Elektronnyaya obrabotka materialov. № 5. 2004. 70-73. Print. **3.** Ermilov I.V. «Vysokovol'tnye impul'snye kondensatory s polimernoii izolyatsiei» Elektrichestvo. № 9. 2006. 73-79. Print. **4.** Rudakov V.V. «Stan ta tendencii rozvitku visokovol'tnykh impul'snykh kondensatoriv» Visnik NTU «KhPI»: zb. nauk. pr.: Tem. vip.: Tehnika i elektrofizika visokih naprug. № 39. 2009. 146-154. Print. **5.** Varshavskii D.S. Silovye kondensatory Pod red. B.M. Tareeva. Moscow: VINITI, 1980. Print. **6.** Butko M.V., Butko S.M., Dubiichuk O.Yu., Rudakov V.V., Sviridok S.N. «Elektricheskie harakteristiki izolyatsii impul'snykh kondensatorov, vkluchayuschih sloi polipropileno-voi plenki tolschinoi 40 mkm» Visnik NTU «KhPI»: zb. nauk. pr.: Tem. vip.: Tehnika i elektrofizika visokih naprug. № 49. 2011. 47-53. Print. **7.** Rudakov V.V., Kasatkin V.P. «Udel'naya energiya vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov s lavsanovym dielektrikom» Visnik NTU «KhPI»: zb. nauk. pr.: Tem. vip.: Tehnika i elektrofizika visokih naprug. № 21. 2012. 233-237. Print. **8.** Spravochnik po elektrotehnicheskim materialam Pod red. Yu.V. Korickogo i dr. T.1.- 3-e izd. pererab. - Moscow: Energoatomizdat, 1986. Print. **9.** Pat. 20693 Ukraina. MPK (2006) N01G 4/018 Sposob ochistki jidkikh dielektrikov, preimuschestvenno polimetilsiloksanovoi jidkosti PMS-10 Onischenko L.I., Gun'ko V.I., Grebennikov I.Yu., Dmitrishin A.Ya., Feschuk T.A.; заявитель i patentoobladatel' ИПТ НАН Украины. - № u200607336; заявл. 03.07.06; опубл. 15.02.07, Byul. № 2. **10.** Pat. 25993 Ukraina. MPK (2006) N01G 4/018 Sposob ochistki aromatischeskikh uglevodородnykh masel, preimuschestvenno fenilksililetana. Grebennikov I.Yu., Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ya., Onischenko L.I., Toporov S.O., Feschuk T.A.; заявитель i patentoobladatel' ИПТ НАН Украины. - № u200705244; заявл. 14.05.07; опубл. 27.08.07, Byul. № 13. **11.** Pat. 25595 Ukraina. MPK (2006) N01G 4/018 Sposob ochistki neftyanykh transformatornykh masel, preimuschestvenno masla T-1500. Onischenko L.I., Gun'ko V.I., Grebennikov I.Yu., Dmitrishin A.Ya., Feschuk T.A.; заявитель i patentoobladatel' ИПТ НАН Украины. - № u200704319; заявл. 19.04.07; опубл. 10.08.07, Byul. № 12. **12.** Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ya., Onischenko L.I., Toporov S.O., Feschuk T.A. «Issledovaniya konstrukcii plenochnogo dielektrika dlya vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov» Elektronnyaya obrabotka materialov. № 2. 2012. 93-96. Print. **13.** Pat. 57999 Ukraina. MPK (2011.01) N01G 13/04 Sposob propitki elektricheskikh kondensatorov s plenochnym dielektrikom. Gun'ko V.I., Grebennikov I.Yu., Dmitrishin A.Ya., Onischenko L.I., Toporov S.O.; заявитель i patentoobladatel' ИПТ НАН Украины. - № u201010500; заявл. 30.08.10; опубл. 25.03.11, Byul. № 6. **14.** Grebennikov I.Yu., Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ya., Mihailov I.G., Onischenko L.I., Feschuk T.A. «Issledovanie zavisimosti resursa vysokovol'tnykh impul'snykh kondensatorov s plenochnym dielektrikom ot rejimov ekspluatatsii» Elektrotehnika. №6. 2006. 36-41. Print.

Поступила (received) 08.09.2014

О. І. ДОРОШЕНКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ОПУ», Одеса

ПРО ФІЗИКУ ВЛАСНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Зважаючи на те, що робочим органом електроенергетичної системи є її електромагнітне поле, яке може існувати лише у її діелектричному середовищі, що оточує струмоведучі частини системи і складається з електромагнітних полів усіх її електроустановок, пропонується у поняття електромагнітної сумісності таких систем вкладати їх спроможність до нормального функціонування за умови нормального навантаження усіх їх електроустановок з визначенням рівня допустимості та необхідності такої сумісності.

Ключові слова: електроенергетична система, електромагнітне поле, електромагнітна сумісність, умови достатності і необхідності електромагнітної сумісності

Вступ. Як відомо, електроенергетика є основою життя людського загалу у всіх сферах його діяльності. Її призначення – безпечне, економне та безперебійне постачання споживачам електричної енергії (ЕЕ). Цю функцію вона здійснює за допомогою своїх виробничо-технічних підрозділів – електроенергетичних систем (ЕЕС). У відповідності до визначення в [1], це сукупність електроустановок у якій переробляються енергоресурси з метою одержання, передачі, розподілу та споживання (перетворення у інші види) ЕЕ. З цього приводу в [2] повідомляється наступне: «...Электромагнитная энергия от места ее генерирования передается к месту потребления по диэлектрику (провода же в линиях передачи выполняют двойную роль: они являются каналами, по которым проходит ток, и организаторами структуры поля в диэлектрике)...»

Таким чином, фізично, ЕЕ є енергією загального електромагнітного поля кожної ЕЕС і її підсистем – систем електропостачання (СЕП) [3]. Оскільки така ЕЕС і СЕП є сукупністю окремих електроустановок, які, у свою чергу, складаються з окремих електротехнічних пристроїв, то нормальна робота такої системи можлива лише у тому випадку, коли електромагнітні поля окремих пристроїв не спотворюють електромагнітні поля інших пристроїв і загального поля системи. Тобто, усі елементи ЕЕС нормально співпрацюють разом у такому полі і така спроможність ЕЕС до нормального виконання згаданих вище функцій називається її власною (технологічною) електромагнітною сумісністю. Автори роботи [4] вважають електромагнітну сумісність глобальною проблемою і наводять таке її визначення: «...Электромагнитная сумісність технічних засобів розглядає пристрої та процеси, описувані в традиційних електротехнічних курсах, з погляду генерування електромагнітних перешкод, їхнього впливу на електроустаткування, ступінь автоматизації та

© О. І. Дорошенко, 2014

корекції негативного впливу... «.

На нашу думку, у першу чергу, необхідно розглядати проблему власної електромагнітної сумісності кожної ЕЕС і її підсистем (СЕР) з урахуванням їх взаємного впливу на екологію (ЕКО-ЕМС), біосферу (БІО-ЕМС), техносферу (ТЕХНО-ЕМС) та інформаційну (електроно-ЕМС) сферу, у відповідності до рис. 1.

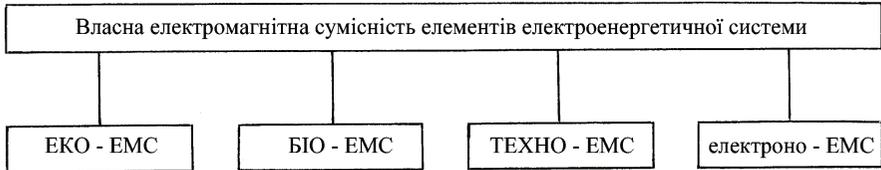


Рисунок 1 – Структурна схема проблеми електромагнітної сумісності

Тому, метою цієї роботи є визначення умови достатності та необхідності збереження власної (внутрішньої) електромагнітної сумісності електроенергетичної системи і усіх її підсистем (систем електропостачання) для забезпечення нормального функціонування.

Дослідження літературних джерел. Відповідно до визначення у нормативному документа [5], що діє в Україні, електромагнітне поле представляється особливим видом матерії. Але таке визначення явно суперечить філософському розумінню матеріальності природи, за якого матерія вважається універсальним будівельним матеріалом Природи, разом з Космосом. Очевидно, що будь-яке поле це такий стан певного об'єму матерії, за якого у ньому починають діяти сили цілком конкретного виду. З фізики [6] відомо, що це Кулонівські сили (діють між електричними зарядами) і сили Кариоліса, які діють при обертанні електронів в атомах діелектриків за їх поляризованого стану.

Атом – найменша матеріальна частинка простої речовини як електрично упорядкований об'єм фізичного вакууму, що налічує певну кількість фітонів (елементарних неподільних матеріальних частинок), частина яких має постійний позитивний заряд (+n), що утримує на круговій орбіті навколо себе еквівалентний негативний заряд, який складається з (-n) одиниць (електронів). Такий електричний зв'язок називається атомним або електронним. При цьому, кожна одиниця позитивного заряду ядра атому утримує на орбіті тільки одну одиницю негативного заряду – один електрон. За твердженням [7], такий зв'язок характерний для провідників ЕЕС.

Найменша матеріальна частинка складної речовини – молекула складається з атомів простих речовин, які об'єднані електричним зв'язком, що створюється між атомами простих речовин при хімічних реакціях. Такий електричний зв'язок називається молекулярним. При цьому, кожна одиниця позитивного заряду кожного атому молекули утримує на круговій орбіті кожного

атому кожен електрон усіх атомів молекули. За твердженням [7], такий зв'язок характерний для діелектричного середовища, що оточує усі струмоведучі частини ЕЕС.

Під дією різниці потенціалів (напруги) в провідному і діелектричному середовищі ЕЕС відбуваються процеси поляризації, за яких кругові орбіти електронів їх атомів набувають овальної форми. При цьому у такому стані середовища у ньому створюються струми зміщення і струми провідності. Очевидно, що їх співвідношення можуть слугувати характеристиками, що визначають електричні властивості електротехнічних матеріалів ЕЕС.

Відносне значення струму зміщення такого матеріалу можна визначити через відношення густини об'ємного струму зміщення δ_{3M} до густини об'ємного струму провідності δ_{PP} , в.о.

$$i_{3M}^* = \delta_{3M} / \delta_{PP} . \quad (1)$$

За даними [2], для діелектричного середовища $i_{3M}^* = 278$ в.о., а для провідного $i_{3M}^* = 5,6 \cdot 10^{-6}$ в.о. Тобто, діелектричне середовище (на відміну від провідного) є електропружним, у якому можуть існувати електромагнітні поля усіх електроустановок ЕЕС, створюючи її загальне електромагнітне поле.

Як відомо, потужність такого поля в площинці, що спирається на елемент довжини електропередачі ∂l , визначається за теоремою Пойтинга, $ВА/м^2$

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} , \quad (2)$$

де \vec{E} – вектор напруженості електричного поля електропередачі, В/м; \vec{H} – вектор напруженості магнітного поля електропередачі, А/м.

Зважаючи на те, що за змінної синусоїдальної напруги і такого ж струму провідності електропередачі $\vec{E} \equiv \vec{U}$ та $\vec{H} \equiv \vec{I}$, спираючись на рівняння (2), для миттєвих значень напруги і струму провідності, що відстає від напруги електропередачі на фазовий кут φ можна написати, кВА

$$\begin{aligned} s &= u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = 2 \cdot (UI \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)) = \\ &= 2 \cdot (UI \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) , \end{aligned} \quad (3)$$

де U_m – амплітудне значення синусоїдальної напруги електропередачі, кВ; I_m – амплітудне значення синусоїдального струму електропередачі, А; U – діюче значення синусоїдальної напруги електропередачі, кВ; I – діюче значення синусоїдального струму електропередачі, А.

Як можна бачити, ЕЕ електропередачі створюється у її електрично пружному діелектричному середовищі одночасною дією на нього напруги і струму провідності, а її повна потужність має дві складові:

Активна потужність, кВт

$$P = UI \cos \varphi . \quad (4)$$

Реактивна потужність, квар

$$Q = UI \cos(\omega t - \varphi) = UI \sin \varphi . \quad (5)$$

Повна потужність, кВА

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (6)$$

Графічно, залежність рівняння (3) представлено на рис.2.

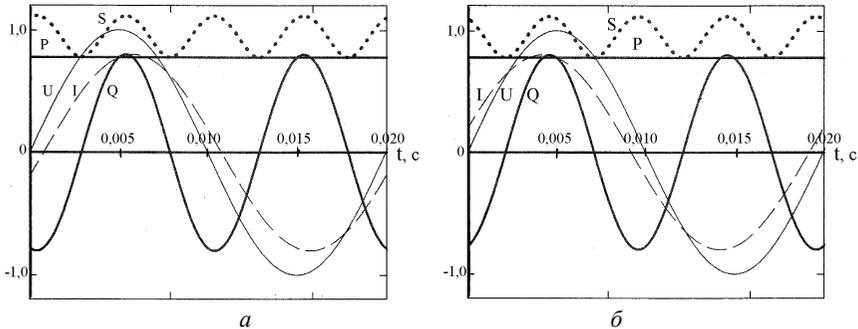


Рисунок 2 – Складові потужності електропередачі ЕЕС: а – струм відстає від напруги; б – струм випереджає напругу

Як можна бачити, активна потужність протягом періоду зміни напруги електропередачі є величиною незмінною і передається до споживача. Реактивна потужність за цей же час двічі змінює величину від нуля до максимального значення, намагається передаватись у середину струмоведучих частин, створюючи при цьому електрорушійну силу (ЕРС) самоіндукції, яка впливає на рівень напруги електропередачі. Тобто, реактивна потужність це внутрішня потужність ЕЕС, яка ні до споживача, і від нього, фізично, передаватись не може.

Якщо синусоїдальність струму навантаження електропередачі спотворюється (наприклад, через не лінійність опору навантаження), то спотворюється і синусоїдальність напруги електропередачі (через несинусоїдальність її електрорушійної сили самоіндукції). Якщо потужність нелінійного навантаження наближається до потужності джерела живлення, то спотворюється і синусоїдальність напруги такого джерела.

Таким чином, фізично, ЕЕ електропередачі є енергією поляризації її діелектричного середовища одночасною дією на нього напруги і струму провідності електропередачі і, через свою реактивну складову, має вигляд хвилі, що біжить від джерела живлення до споживача.

Зважаючи на пріоритетність напруги у такому процесі можна зробити висновок про те, що як товарна продукція ЕЕС, ЕЕ це робота, яку виконують генератори електростанцій системи для створення напруги на їх затискачах. Приймаючи до уваги, що така напруга це різниця потенціалів електромагнітного поля системи, очевидно, що її можна вважати потенціальною формою

ЕЕ електропередач, а показники її якості у нормальному режимі роботи ЕЕС можуть слугувати показниками рівня її власної електромагнітної сумісності, що підтверджується вимогами [8]. При цьому, найпершими показниками якості напруги (ЕЕ) можна вважати її частоту і рівень напруги джерела живлення електропередачі, які (за даними [9]), суттєво залежать від статичних характеристик вузлів комплексного навантаження споживача. Такі характеристики наведено на рис. 3.

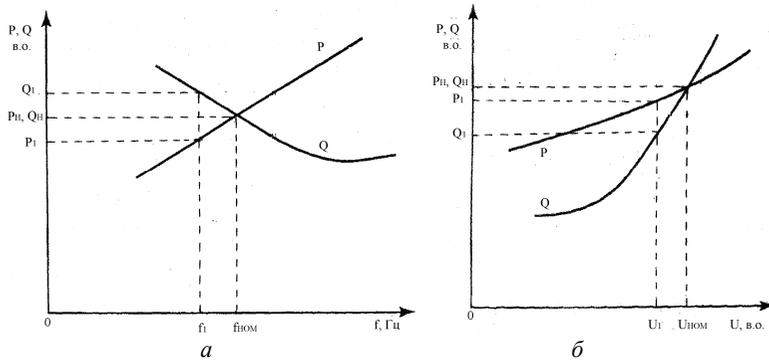


Рисунок 3 – Статичні характеристики комплексного навантаження: *а* – за частотою; *б* – за напругою

Тобто, у кожному вузлі ЕЕС, у кожен момент часу її роботи активна і реактивна потужність, генерована елементами системи повинна відповідати потужності навантаження (потужності споживачів електроенергії) разом з їх втратами. Таке співвідношення між вказаними потужностями називають енергетичним балансом вузла, який повинна забезпечувати ЕЕС.

Активний баланс вузла можна записати як

$$\Sigma P_{\Gamma} = \Sigma P_{H} + \Sigma P_{ВП} + \Sigma \Delta P = \Sigma P_{СП}, \quad (7)$$

де ΣP_{Γ} – сумарна активна «генерована» потужність ЕЕС; ΣP_{H} – активне навантаження споживачів; $\Sigma P_{ВП}$ – сумарна активна потужність власних потреб ЕЕС; $\Sigma \Delta P$ – втрати активної потужності в мережах ЕЕС; $\Sigma P_{СП}$ – сумарна активна потужність споживачів.

Відповідно до (7) реактивний баланс вузла можна представити як

$$\Sigma Q_{\Gamma} = \Sigma Q_{H} + \Sigma Q_{ВП} + \Sigma \Delta Q_{M} - \Sigma Q_{C} - \Sigma Q_{K} = \Sigma Q_{СП}, \quad (8)$$

де ΣQ_{Γ} – сумарна реактивна «генерована» потужність ЕЕС; ΣQ_{H} – реактивне навантаження споживачів; $\Sigma Q_{ВП}$ – реактивна потужність власних потреб ЕЕС; $\Sigma \Delta Q_{M}$ – «втрати» реактивної потужності в мережах ЕЕС; ΣQ_{C} – зарядна потужність ліній електропередач при напрузі 110 кВ та вище; ΣQ_{K} – сумарна реактивна потужність пристроїв реактивної компенсації; $\Sigma Q_{СП}$ – су-

марне реактивне навантаження споживачів.

Оскільки ЕЕ безпосередньо приймає участь при створенні продукції інших видів у споживачів, то її якість повинна суворо відповідати вимогам нормативних документів. Нажаль, обов'язкова її сертифікація проводиться тільки по відношенню до відхилення частоти і напруги джерел живлення споживачів. Але їх збиток від порушення умов електромагнітної сумісності в мережах споживачів не контролюється, [10].

За даними [11], в 2006 – 2007 р.р. в країнах Європейського Союзу збиток від порушення умов електромагнітної сумісності (провали напруги, короткотривалі і довготривалі перерви електропостачання, вищі гармоніки, перенапруги, флікери, короткі замикання) складав величину понад 150 млрд. євро. Тому в [12] пропонується створити спеціальний центр управління якістю ЕЕ на державному рівні.

Висновки.

1. Електроенергія як товарна продукція ЕЕС це робота, яку виконують генератори її електростанцій для створення напруги на своїх затискачах.

2. Напруга електропередачі – потенційна форма її електроенергії тому показники її якості є показниками електроенергії.

3. Нормальна робота електропередачі можлива лише тоді, коли показники якості її напруги відповідають нормам державного стандарту, який гарантує електромагнітну сумісність електроустановок електропередачі.

4. Умови електромагнітної сумісності електропередачі необхідно розглядати у двох аспектах – як достатні і необхідні.

5. Умова достатності електромагнітної сумісності електропередачі – наявність трифазної симетричної і синусоїдальної напруги, діюче значення якої не виходить за межі $(1 \mp 0,1)U_{НОМ}$ кВ, а її частота за межі $(1 \mp 0,4)f_{НОМ}$ Гц, усі інші вимоги ДЕСТу – умови необхідності.

6. Відповідальність за умови достатності електромагнітної сумісності електропередачі є прерогативою ЕЕС, яка закріплюється у договорі на користування ЕЕ між електропостачальною організацією і споживачами.

7. Відповідальність за умови необхідності електромагнітної сумісності електропередачі – прерогатива споживачів, яка закріплюється у договорі на користування ЕЕ між електропостачальною організацією і споживачами. 8. Нормативні документи України з електромагнітної сумісності потребують переробки.

Список літератури: 1. ПУЕ 2009. Правила улаштування електроустановок. 2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – Изд. 6-е. Учебник для студ. энергетич. и электротехнич. вузов. – М.: Высш. школа, 1973. – 752 с. 3. Дорошенко О.І. Про фізику електромагнітного поля електроенергетичної системи / О.І. Дорошенко // Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів». – Кременчук, 2–4 листопада 2012 р. – С. 33 – 35. 4. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / І.В. Жежелевко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Сасенко. – Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с. 5. ДЕСТУ 2843–94. Державний стандарт України. Електротехніка.

Основні поняття. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1995. – 66 с. **6.** Ландау Л.Д. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика / Л. Д. Ландау, А.И. Ахиезер, Е.М. Лифшиц // М.: Изд. Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1969. – 399 с. **7.** Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. 7-е изд. / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, В.М. Тареев / Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ие, 1985. – 304 с. **8.** ГОСТ 13109. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск. Издательство стандартов, 1998. – 31 с. **9.** Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 427 с. **10.** Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с. **11.** Gargosz R. (European Copper Institute, Poland) and Manson J. (GEL Consulting, United Kingdom). – 19th Inter. Conf. on Electricity Distribution (CIRED). – Vienna, 21 – 24. May 2007. **12.** Карташев И.И. Системный подход к управлению качеством электрической энергии / И.И. Карташев, Д.С. Подольский // Электричество. – 2009. – № 5. – С. 2-7.

Bibliography (transliterated): **1.** Rules of arrangement of electrical installations. Kharkiv: Pu,linhig house «Fort», 2009. 704 P. Print. **2.** Bessonov L.F. Theoretical foundations of electrical engineering. L.A. Bessonov. Ed. 6-that is, a Textbook for student's energy and electrotechnics. – Moscow: The High school, 1973. 752 P. Print. **3.** Doroshenko A.I. On physics of electromagnetic floor electric power system. A.I. Doroshenko. «Fiscal processes and fields of technical and biological objects». Kremenchug, 2 – 4 November 2012. P. 33-35. Print. **4.** Electromagnetic compatibility in power supply systems. Textbook. I.V. Gegelenko, A.K. Shydlovski, G.G. Pivnyak, U.L. Saenko. D., The NAC girmic. University, 2009. 319 P. Print. **5.** DSTU 2843-94. The state standard of Ukraine. Electrical engineering. Basic concepts. Terms and definitions. Kiev. State standard of Ukraine, 1995. 66 P. Print. **6.** Landau L.D. Course of General physics. Mechanics and molecular physics. .D. Landau, A.I. Akhieser, E.M. Lifshits. Moscow: Izd. «Science». Editorial of physic-mathematical literature. 1960. 399 P. Print. **7.** Bogoroditsky N.P., Pasinkov V.V., Tareev B.M. Electrometrical materials. Textbook for universities. 7-th ed. Leningrad: Energoatomizdat. Leningrad separation, 1985. 304 P. Print. **8.** GOST 13109. Interstate standard. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Norms of quality of electric energy in power supply systems of General purpose. Minsk. Standards publishing house, 1998. 31 P. Print. **9.** V.A. Venikov, Transient electromechanical processes in electric systems. Moscow: «High school», 1985. 427 P. Print. **10.** Quality management energy. I.I. Kartashev, V.N. Tulsiky, R.G. Shamonov and others, edited by Y. Sharov. – Moscow: Publishing of Moscow power engineering Institute, 2006. 320 P. Print. **11.** Gargosz R. (European Copper Institute, Poland) and Manson J. (GEL Consulting, United Kingdom). 19th Inter. Conf. on Electricity Distribution (CIRED). Vienna, 21-24.May 2007. Print. **12.** Kartashev I.I. System approach to the management of quality of electrical energy. I.I. Kartashev, D.S. Podolsky. Electricity. № 5. 2009. P 2-7. Print.

Поступила (received) 15.09.2014

А. Д. ЗАЙЧЕНКО, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

О. Н. СИЗОНЕНКО, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

Е. М. ШЕРЕГИЙ, PhD., Dsc., Prof., Центр микроэлектроники и нанотехнологий Жешувского университета, Жешув, Польша;

Е. В. ЛИПЯН, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

А. С. ТОРПАКОВ, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

Н. С. ПРИСТАШ, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

В. А. ТРЕГУБ, инженер, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ПОРОШКОВ

Рассмотрены возможности разрядно-импульсной технологии обработки порошков разного состава с целью их диспергирования, активации, инициации структурно-фазовых превращений, синтеза порошковой шихты для создания материалов с повышенными физико-механическими и функциональными свойствами. Для исследуемых порошков металлов, твердых и сверхтвердых материалов установлены режимы обработки, обеспечивающие требуемый уровень дисперсности и необходимый фазовый состав.

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд, дисперсная система, диспергирование, активация, синтез, модификация поверхности, порошки, карбиды металлов, алмазы, твердые сплавы, карбид кремния, карбид бора, карбидостали.

Введение. Развитие основных отраслей современного машиностроения предъявляет к конструкционным и инструментальным материалам неуклонно возрастающие требования к статической и динамической прочности, сопротивлению хрупкому разрушению, износостойкости в различных условиях эксплуатации. Уровень перечисленных свойств определяет в значительной степени надежность деталей, узлов, рабочих органов машин, механизмов, технологической оснастки и оборудования [1].

Одним из эффективных путей существенного повышения основных физико-механических и эксплуатационных свойств конструкционных материалов является подход, предусматривающий диспергирование структуры таких материалов до субмикронного или наноразмерного уровня, согласно соотношения Холла-Петча [2–6]. В порошковой металлургии такой подход может

© А. Д. Зайченко, О. Н. Сизоненко, Е. М. Шерегий, Е. В. Липян, А. С. Торпаков, Н. С. Присташ, В. А. Трегуб, 2014

реализовываться как на стадии подготовки порошков, так и в процессе изготовления изделий и заготовок. Поэтому вызывают интерес технологии, которые позволяют активировать и диспергировать частицы порошков до ультрадисперсных размеров.

Известно, что наиболее эффективными и экологически безопасными методами воздействия на различные дисперсные системы являются физические методы, которые способствуют изменению их свойств. Одним из таких методов является использование высоковольтного электрического разряда (ВЭР), который характеризуется сочетанием воздействия электромагнитных полей и высокой скорости ввода энергии в плазменный канал разряда, что приводит к возникновению термических полей непосредственно в канале разряда и его ближней зоне, а также формированию волн давления в жидкости, близких к ударным, которые трансформируются в акустические с широким спектром частот, а также мощные гидропотоки и кавитацию.

Эти явления способствуют применению разрядно-импульсных технологий (РИТ), которые базируются на использовании ВЭР, во многих отраслях промышленности, поскольку позволяют влиять как на изменение геометрических размеров объекта, так и на структуру материалов с целью придания им определенных механических и физических свойств.

Целью данной работы является рассмотрение возможностей РИТ обработки порошков разного состава с целью их диспергирования, активации, инициации структурно-фазовых превращений, синтеза порошковой шихты для создания в итоге материалов с повышенными физико-механическими свойствами.

Материалы и методы. Для исследований были использованы дисперсные системы типа «порошок – жидкость». Исследовались порошки алмаза, кубического нитрида бора, карбида кремния, а также железа, титана, кобальта, карбида вольфрама, карбида бора и их смеси (составов ВК6+1 % АСУД75, 75 % Fe + 20 % Ti + 5 % В₄С, 75 % Fe + 25 % Ti и 20 % Fe + 80 % Ti). В качестве жидкой фазы использовалась дистиллированная вода и углеводородная жидкость – керосин. Для интенсификации процессов диспергирования в жидкость добавлялись растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ): катионоактивный ПАВ Катапин-бактерицид концентрацией 6 г/дм³ и многокомпонентная смесь анионных и неионогенных ПАВ НМК-РХ концентрацией 3 г/дм³ [7].

Исследования проводились на экспериментальном стенде, схема и описание которого приведены в работах [8, 9]. Разрядная камера снабжена электродной системой типа «острие – плоскость» с регулируемым межэлектродным промежутком. Параметры обработки варьировались в пределах: напряжение заряда накопителя – от 25 до 50 кВ; индуктивность разрядного контура – от 0,6 до 3 мкГн; скорость нарастания тока – от 11 до 30 ГА/с; удельная энергия от 10 до 40 МДж/кг.

Анализ размеров и формы частиц выполнялся на микроскопах – оптиче-

ском Биолам-И, электронном – РЭММА-105 по микрофотографиям в среде Image Pro Plus; диагностика морфометрических характеристик алмазов – на приборе «DiaInspect.OSM», рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ – на дифрактометре ДРОН-3 (излучение $\text{Cu}_{K\alpha}$, база JCPDS PDF-2), количество образовавшейся фазы карбида титана определялось методом «подмешивания» [10].

Консолидация порошков проводилась методом искро-плазменного спекания (ИПС) на экспериментальном оборудовании «Гефест-10» [11]. Консолидированные образцы исследовались методами рентгеноструктурного и микроскопического анализа, измерялись их износостойкость, твердость и прочность на изгиб.

Результаты и обсуждение. Экспериментальные исследования показали, что ВЭР обработка микропорошков алмаза АСМ 20/14 в воде и водных растворах Катапина приводит к уменьшению средних значений параметров, характеризующих размер частиц микропорошка, увеличению удельной поверхности и существенному изменению как качественной, так и количественной картины распределения частиц микропорошка по размерам [12]. Установлено, что при увеличении скорости нарастания тока di/dt от 11 до 30 ГА/с, при одинаковой удельной энергии обработки $W_{уд} = 40$ МДж/кг, интенсифицируются процессы изменения всех морфометрических характеристик алмазных микропорошков АСМ 20/14, а минимальный размер частиц уходит в область < 1 мкм. Использование в качестве рабочей среды водного раствора Катапина позволяет добиться увеличения доли мелкодисперсных частиц, а также изменения формы частиц микропорошка АСМ 20/14 [13].

Правомерность выявленных тенденций связи зависимости морфометрических характеристик микропорошков АСМ 20/14 с параметрами ВЭР воздействия подтвердилась при обработке микропорошков кубического нитрида бора ВМ 2/1. Увеличение удельной энергии обработки с 10 до 20 МДж/кг и скорости нарастания тока с 16 до 25 ГА/с позволило интенсифицировать процесс измельчения частиц микропорошков кубического нитрида бора ВМ 2/1. Установлено, что ВЭР обработка при $W_{уд} = 20$ МДж/кг и $di/dt = 25$ ГА/с обеспечивает увеличение содержания частиц размером $< 0,5$ мкм от 1 до 78 % (см. рис. 1) [14].

Аналогичный результат наблюдается и при ВЭР воздействии в воде на порошки твердого сплава ВК6 (карбид вольфрама + 6 % Со) с добавкой 1 % ультрадисперсного синтетического алмаза АСУД75. Увеличение удельной энергии воздействия с 10 до 20 МДж/кг на водную суспензию смеси порошков ВК6 + АСУД75 существенно смещает распределение частиц по размерам в область мелких фракций. Одномодальное распределение по размерам исходного порошка от 0,5 до 6 мкм с пиком ~ 2 мкм после ВЭР обработки принимает бимодальный вид с диапазонами размеров от 0,1 до 0,8 мкм и от 1 до 5 мкм с пиками $\sim 0,3$ и ~ 2 мкм соответственно (см. рис. 2), а удельная поверхность увеличивается от $3,8 \text{ м}^2/\text{см}^3$ до $14,8 \text{ м}^2/\text{см}^3$ [15].

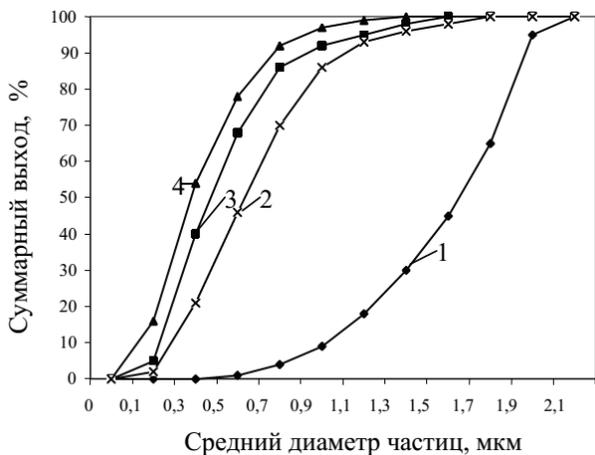


Рисунок 1 – Распределение по размерам частиц микропорошка кубонита VM 2/1: 1 – исходный порошок; 2 – обработанный при $W_{уд} = 10$ МДж/кг и $di/dt = 16$ ГА/с; 3 – обработанный при $W_{уд} = 20$ МДж/кг и $di/dt = 16$ ГА/с; 4 – обработанный при $W_{уд} = 20$ МДж/кг и $di/dt = 25$ ГА/с

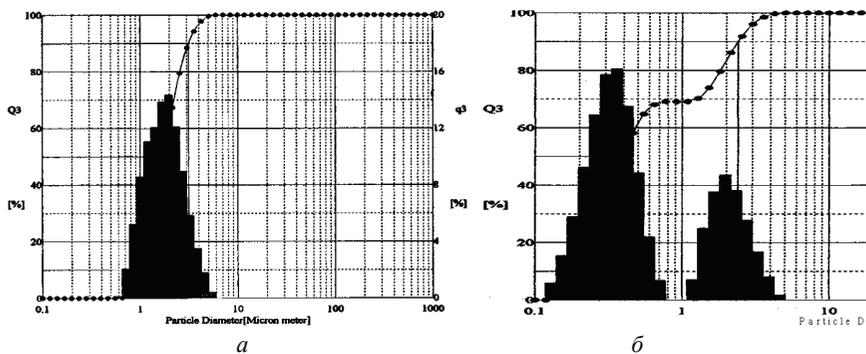


Рисунок 2 – Распределение по размерам частиц порошка VK6 и ACSUD75: а – исходный порошок; б – порошок, обработанный при $W_{уд} = 20$ МДж/кг

ВЭР обработка порошка карбида кремния в воде при скорости нарастания тока 25 ГА/с и удельной энергии 10 МДж/кг способствовала уменьшению размеров частиц в ~ 2 раза (исходный пик ~ 48 мкм, после ВЭР ~ 25 мкм). Увеличение удельной энергии обработки до 20 МДж/кг к значительным изменениям не привело.

Известно, что наряду с процессом диспергирования металлов в дисперсной системе «металл – вода» при ВЭР неизбежно развиваются окислительные процессы [16]. Использование углеводородной жидкости в отличие от воды позволяет избежать окисления частиц обрабатываемого металла. Отли-

чительной особенностью ВЭР в углеводородной среде является ее деструкция (разрыв цепочек связей) под воздействием температуры плазменного канала разряда и импульсного давления с образованием активных наночастиц различных аллотропных модификаций углерода [17, 18], что позволяет обеспечить условия для синтеза металл-углеродных соединений.

Термодинамический анализ системы углеводородная жидкость (керосин) – порошковая смесь позволил установить наиболее вероятный состав порошковой смеси после ВЭР воздействия. Так, для порошковой смеси Fe–Ti–B₄C возможно образование следующих составов (в порядке уменьшения массовой доли): остаточные непрореагировавшие Ti и Fe, TiC (наибольший приоритет реакций образования), TiB и TiB₂, FeTi и Fe₂Ti, Fe₃C, FeB и Fe₂B (достаточно малые количества), следы TiH₂; а также вероятно небольшое количество остаточного углерода (который образуется при пиролизе керосина). Применение термодинамического анализа позволило обосновать условия для протекания химических превращений. В частности, в рабочей камере реактора необходимо обеспечить многократное попадание всей смеси в канал разряда и околоразрядную зону. Условия для протекания реакций создаются и в микроплазменных каналах между частицами порошка, по которым проходит ток.

Обработка индивидуальных порошков железа, титана и их смесей, в том числе с карбидом бора, (75 % Fe + 20 % Ti + 5 % B₄C, 75 % Fe + 25 % Ti и 20 % Fe + 80 % Ti) выполнялась в керосине при увеличении удельной энергии воздействия от 10 МДж/кг до 40 МДж/кг и скорости нарастания тока от 12 до 28 ГА/с. ВЭР обработка порошка состава 20 % Fe + 80 % Ti при $W_{уд} = 40$ МДж/кг и $di/dt = 28$ ГА/с приводит к интенсивному измельчению частиц (~ 41 % лежит в области частиц размером 1,4 мкм, а ~ 43 % имеет размер менее 0,3 мкм), изменению их морфологии (исходные частицы округлой формы с фактором формы по Салтыкову $\Phi \sim 0,65$ изменяют форму на сферическую $\Phi \sim 0,9$) и увеличению значения удельной поверхности (со 120 до ~ 1100 см²/г), что способствует их активации. Для всех индивидуальных порошков железа, титана, и смесей 75 % Fe + 20 % Ti + 5 % B₄C, 75 % Fe + 25 % Ti результаты ВЭР обработки аналогичны.

Добавка в керосин ПАВ (НМК-РХ или Катапина) подобно описанным выше результатам обработки алмазных микропорошков увеличивает количество частиц с размером менее 1 мкм – пик распределения (46 %) соответствует размеру ~ 0,5 мкм. Установлено, что плотность тока в проводящем канале (j_k), который формируется в слое порошков, является одним из факторов, влияющих на процессы измельчения и карбидизации. Так, увеличение плотности тока в проводящем канале от ~ 0,21 до 1,48 кА/мм² при обработке порошка Ti способствует увеличению в два раза количества частиц менее 1 мкм. При максимальной плотности тока 1,48 кА/мм² в проводящем канале образуется максимальное (массовая доля более 40 %) количество частиц в диапазоне от 0,1 до 1 мкм, из которых ~ 60 % составляет карбид титана (см. рис. 3, 4) [19, 20].

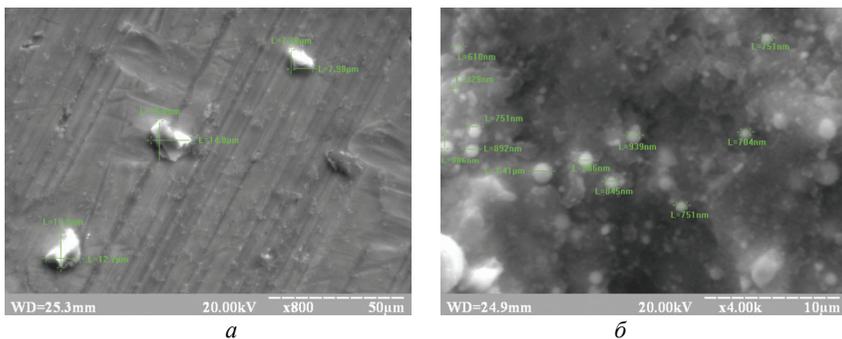


Рисунок 3 – Микроэлектронные фотографии порошка Тi до и после обработки $W_{уд} = 40$ Мдж/кг: а – исходный, увеличение $\times 800$; б – после ВЭР, увеличение $\times 4000$

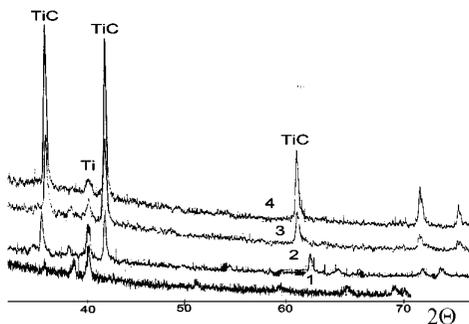


Рисунок 4 – Дифрактограммы исходного порошка Тi до и после его ВЭР обработки при разных значениях плотности тока в канале разряда: 1 – исходный порошок Тi; 2 – порошок Тi после ВЭР обработки при $j_k=0,08$ кА/мм²; 3 – $j_k=0,25$ кА/мм²; 4 – $j_k=0,56$ кА/мм²)

Для исследования влияния РИТ обработки порошков (на примере смеси 75 % Fe + 20 % Ti + 5 % В₄С) на изменение физико-механических свойств консолидированных материалов было выполнено их искро-плазменное спекание (ИПС). Консолидация проводилась при скорости нагрева 100 °С/мин (1,65 °С/с), времени выдержки 120 с при температуре 820 °С и давлении 60 МПа. После ИПС для устранения ликвации, то есть неоднородности химического состава внутри отдельных зерен или в объеме сплава, был применен отжиг при температуре 850 °С. Далее проводилась закалка при 870 °С с охлаждением в воде и низкотемпературный отпуск при 180–200 °С для устранения внутренних напряжений.

Образцы карбидосталей системы Fe–Ti–В–С имеют мелкозернистую структуру, упрочненную тугоплавкими соединениями TiC, TiB, TiB₂ (рис. 5, а). Плотность образцов близка к теоретической, а твердость составляет 53 HRC. После термообработки образцы сохранили мелкозернистую струк-

туру с равномерно распределенными упрочняющими фазами (рис. 5, б). Микротвердость светлой фазы (упрочняющей) – 16,48 ГПа, темной (матрицы) – 9,27 ГПа, что соответствует мартенситу отпуска, а твердость образцов составляет 68 HRC. Применение РИТ обработки порошков позволило получить и сохранить размер упрочняющих структур карбидов и боридов в составе полученных образцов. Это значительно повлияло на их механические характеристики: прочность на изгиб составила $\sigma_{\max} \approx 1350$ МПа, износостойкость при абразивном износе $m_{\text{изн}} \approx 51$ мкм/км, что превышает характеристики закаленной дисперсноупрочненной быстрорежущей стали Р6М5, твердость которой 60 HRC, прочность на изгиб 1100 МПа, а износостойкость $m_{\text{изн}} \sim 61$ мкм/км [21].

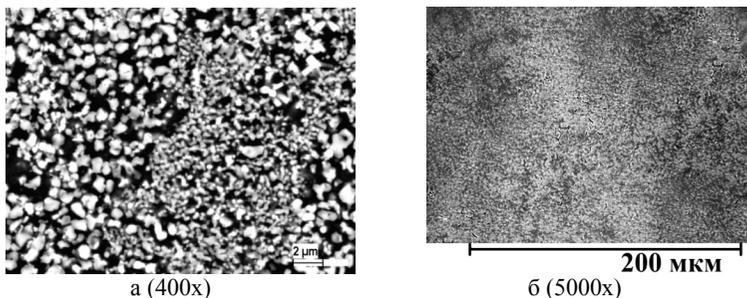


Рисунок 5 – Микроструктуры композиции Fe–Ti–B–C (а – после ИПС; б – после термообработки)

Выводы. Рассмотрены возможности разрядно-импульсной технологии обработки порошков разного состава с целью их диспергирования, активации, инициации структурно-фазовых превращений, синтеза порошковой шихты для создания в итоге материалов с повышенными физико-механическими и функциональными свойствами.

Достижение скорости нарастания тока в исследуемых режимах от 11 до 30 ГА/с при обеспечении удельной энергии обработки от 10 до 40 МДж/кг позволяет осуществить эффективное диспергирование и активацию поверхности для всех представленных порошков (твердых и сверхтвердых материалов и металлов). Добавка в рабочую жидкости растворов ПАВ интенсифицирует воздействие ВЭР обработки на порошки.

Обработка порошков металлов в керосине позволяет, помимо диспергирования и активации, осуществлять направленный синтез шихты прогнозируемого состава с дисперсными упрочняющими частицами карбидов и боридов. При этом увеличение плотности тока в канале разряда от 0,21 до 1,48 кА/мм² приводит к увеличению дисперсности и содержания упрочняющих частиц.

Образцы карбидостали, консолидированные из шихты, синтезированной методом РИТ обработки порошков, имеют повышенные физико-

механические свойства по сравнению со стандартными быстрорежущими сталями.

- Список литературы. 1.** Материалы и технологии // Неорганическое материаловедение. Энциклопедическое изд. : в 2 т. / Под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. – К. : Наукова думка, 2008. – Т. 2, кн. 1. – 856 с. **2.** *Chokshi H.* On the validity of the Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials / *H. Chokshi, A. Rosen, J. Karch* [et al] // Scripta Metallurgica. – 1989. – Vol. 23, Issue 10. – P. 1679 – 1683. **3.** *Морозов А. П.* Перспективные сверхмелкозернистые твердые сплавы типа WC-Co / *А. П. Морозов* // Технология неорганических веществ и материалов. – 2005. – № 11. – С. 87–90. **4.** *Скороход В. В.* Химические, диффузионные и реологические процессы в технологии порошковых материалов / *В. В. Скороход, Ю. М. Солонин, И. В. Уварова.* – К. : Наукова думка, 1990. – 248 с. **5.** *Андриевский Р. А.* Порошковое материаловедение / *Р. А. Андриевский.* – М. : Металлургия, 1991. – 207 с. **6.** *Koch C. C.* Top-down synthesis of nanostructured materials : mechanical and thermal processing methods / *C. C. Koch* // Reviews on Advanced Materials Science. – 2003. – No. 5. – P. 91-99. **7.** *Сизоненко О. Н.* Модифицирующее влияние импульсных высоковольтных разрядов на активность растворов поверхностно-активных веществ / *О. Н. Сизоненко, Э. И. Тафтай, Р. И. Малая* [и др.] // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2008. – № 44 – С. 137-146. **8.** *Сизоненко О. Н.* Электроразрядный синтез наноразмерных металл-углеродных композиционных порошков / *О. Н. Сизоненко, Г. А. Баглюк, А. И. Райченко* [и др.] // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. Збірник наукових праць. – К.: 2012. – Т. 10, вип. 1. – С. 135-144. **9.** *Sizonenko O. N.* Variation in the particle size of Fe–Ti–BaC powders induced by high-voltage electrical discharge / *O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, A. I. Raichenko* [et al] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2012. – Vol. 51, Issue 3. – P. 129-136. **10.** *Горелик С. С.* Рентгенографический и электроннооптический анализ / *С. С. Горелик.* – Изд. 2-е. – М. : Металлургия, 1970. – 336 с. **11.** Пат. 101575 Україна, МПК B22F 3/14, B22F 3/105, B30B 15/02. Пристрій для іскроплазмового спікання порошків / *Сизоненко О. М., Івлев А. І., Райченко О. І.* [та ін.]. – № 201200957; заявл. 30.01.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. **12.** *Богатырева Г. П.* Влияние обработки высоковольтным электрическим разрядом на морфометрические характеристики алмазных порошков / *Г. П. Богатырева, О. Н. Сизоненко, Н. А. Олейник* [и др.] // Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАНУ. Сборник научных трудов. Выпуск № 14 «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления». – К.: 2011. – С. 272 – 277. **13.** Пат. 49909 Україна, МПК B24D 3/06, C01B 31/06. Спосіб виготовлення мікропорошків надтвердого матеріалу / *Богатырева Г. П., Майстренко А. Л., Сизоненко О. М., Олійник Н. О.* [та ін.]. – № 200913969; заявл. 30.12.2009; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9. **14.** *Богатырева Г. П.* Высоковольтный электрический разряд в жидкости как метод воздействия на основные характеристики микропорошков кубического нитрида бора / *Г. П. Богатырева, А. Л. Майстренко, О. Н. Сизоненко* [и др.] // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – Вип. 40. – С. 27-32. **15.** Пат. 98520 Україна, МПК B02C 19/18, B22F 9/14. Спосіб одержання тонкодисперсних металевих порошків / *Сизоненко О. М., Тафтай Е. І., Райченко О. І.* [та ін.] – № a201008652; заявл. 12.07.2010; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10. **16.** *Журавков С. П.* Исследование физико-химических процессов при электроискровой обработке металлических загрузок в водных растворах / *С. П. Журавков, Г. Л. Лобанова, Н. А. Яворовский* [и др.] // Сб. трудов международной научной конференции «Становление и развитие научных исследований в высшей школе» [посвящ. 100-летию со дня рождения проф. А. А. Воробьева], Томск, 14 – 16 сентября 2009. – Томск : ТПУ, 2009. – Т. 2. – С. 288-293. **17.** *Богуславский Л. З.* Электровзрывной метод получения фуллеренов / *Л. З. Богуславский* [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 4. – С. 30- 34. **18.** Пат. 77370 Україна, МПК C01B 31/06. Спосіб одержання порошку синтетичного ультрадисперсного алмазу / *Вовченко О. І., Городян В. І., Кускова Н. І.* [та ін.]; заявник і патентовласник ППТ НАН України. – №200512866; заявл. 30.12.05; опубл. 15.11.06, Бюл. № 3. **19.** *Sizonenko O. N.* Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge / *O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, E. I. Taftai* [et al] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – Vol. 52, Issue 5. – P. 247-253.

20. Пат. 97890 Україна, МПК С01В 31/30, В01J 3/06, В22F 9/14, В82В 3/00. Спосіб одержання карбідів металів перехідної групи / Сизоненко О. М., Тафтай Е. І., Райченко О. І. [та ін.]. – № а201011723; заявл. 04.10.2010; опубл. 26.03.2012, Бюл. № 6. 21. Сизоненко О. М. Отримання карбідосталей системи Fe–Ti–B–C з використанням високовольного розряду в рідині для підготовки шихти / О. М. Сизоненко, С. Г. Григорьев, А. Д. Зайченко [та ін.] // Наукові нотатки. Міжзв'язський збірник. Вип. 42. – Луцьк, 2013. – С. 254–261.

Bibliography (transliterated): 1. Gnesin, G. G., and V. V. Skorohod, eds. "Materialy i tehnologii." Neorganicheskoe Materialovedenie. Vol. 2. Kiev: Naukova Dumka, 2008. Print. 2. Chokshi H. et al. "On the validity of the Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials" Scripta Metallurgica. Vol. 23, Issue 10. 1989. 1679–1683. Print. 3. Morozov, A. P. "Perspektivnye sverhmelkozernistye tverdye splavy tipa WC–Co." Tehnologija neorganicheskikh veshhestv i materialov 11 (2005): 87–90. Print. 4. Skorohod, V. V., Ju. M. Solonin, and I. V. Uvarova. Himicheskie, diffuzionnye i reologicheskie processy v tehnologii poroshkovykh materialov. Kiev: Naukova dumka, 1990. Print. 5. Andrievskij, R. A. Poroshkovoe materialovedenie. Moscow: Metallurgija, 1991. Print. 6. Koch, C. C. "Top-down synthesis of nanostructured materials: mechanical and thermal processing methods." Reviews on Advanced Materials Science 5 (2003): 91–99. Print. 7. Sizonenko, O. N. et al. "Modificirujushhee vliyanie impul'snykh vysokovol'tnykh razrjadov na aktivnost' rastvorov poverhnostno-aktivnykh veshhestv." Visnyk NTU "KhPI". No. 44. 2008. 57–62. Print. 8. Sizonenko, O. N. et al. "Jelektrozrazjadnyj sintez nanorazmernih metall-uglerodnykh kompozicionnykh poroshkov." Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnolohiyi. Zbirnyk naukovykh prats'. Vol. 10. Issue 1. 2012. 135 – 144. Print. 9. Sizonenko, O. N. et al. "Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge" Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Vol. 51, Issue 3. 2012. 129 – 136. Print. 10. Gorelik, S. S. Rentgenograficheskij i jelektronnoopticheskij analiz. Moscow: Metallurgija, 1970. Print. 11. Syzonenko, O. M. et al. Device of spark-plasma sintering powders. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, assignee. Patent of Ukraine 101575. 10 April 2013. Print. 12. Bogatyreva, G. P. et al. "Vliyanie obrabotki vysokovol'tnym jelektricheskim razrjadom na morfometricheskie harakteristiki almaznykh poroshkov" Porodorazrushajushhij i metalloobrabatvujushhij instrument – tehnika i tehnologija ego izgotovlenija. 14. 2011. Kiev. 272–277. Print. 13. Bohatyriova, H. P. et al. Method of producing micropowders of superhard materials. V. Bakul Institute of Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine et al, assignee. Patent of Ukraine 49909. 11 May 2010. Print. 14. Bogatyreva, G. P. et al. "Vysokovol'tnyj jelektricheskij razrjad v zhidkosti kak metod vozdejstvija na osnovnye harakteristiki mikroporoshkov kubicheskogo nitrida bora" Prohresy vni tehnolohiyi i systemy mashynobuduvannya: Mizhnarodnyy zb. naukovykh prats'. 40. 2010. Donets'k. 27–32. Print. 15. Syzonenko, O.M. et al. Method for producing fine metal powders. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, assignee. Patent of Ukraine 98520. 25 May 2012. Print. 16. Zhuravkov S. P. et al. "Issledovanie Fiziko-himicheskikh Processov Pri Jelektroiskrovoj Obrabotke Metallicheskikh Zagruzok v Vodnyh Rastvorah." Proc. of Stanovlenie i razvitie nauchnykh issledovanij v vysshej shkole. Tomsk: TPU, 2009. 288–293. Print. 17. Boguslavskij L. Z. et al. "Jelektrozryvnoj metod poluchenija fullerenov." Jelektronnaja obrabotka materialov 4 (2002): 30–40. Print. 18. Vovchenko, O. I. et al. Method for preparing powder of synthetic ultradisperse diamond. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, assignee. Patent of Ukraine 77370. 15 November 2006. Print. 19. Sizonenko, O. N. et al. "Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge." Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Vol. 52, Issue 5. 2013. 247–253. Print. 20. Syzonenko, O.M. et al. Process for the preparation of metal carbides of transition group. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, assignee. Patent of Ukraine 97890. 26 March 2012. Print. 21. Syzonenko, O. M. et al. "Otrymannya karbidostaley systemy Fe–Ti–B–C z vykorystannjam vysokovol'tnoho rozryadu v ridyni dlya pidhotovky shykty." Naukovi notatky. Mizhvuziv's'kyi zbirnyk. 42. 2013. Luts'k. 254–261. Print.

Поступила (received) 14.10.2014

ИСАМ М. А. АБДЕЛЬШАФИ, инженер, Республика Судан

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НА НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЯХ

В статье рассмотрена проблема обеспечения электромагнитной совместимости на нефтеперекачивающих станциях – объектах с жесткой электромагнитной обстановкой. Отсутствие нормативной базы по ЭМС для таких объектов приводит к тому, что не реализуется системный подход к защите от опасных электромагнитных воздействий. Проведен анализ источников и приемников электромагнитных воздействий, возможных рисков и последствий из-за несоблюдения электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, нефтеперекачивающая станция,.

Введение. Нефтяная и газовая промышленность в народном хозяйстве любой страны играет очень большую роль, так как они являются главным источником энергии. Важное место в этих отраслях занимает транспортная система нефти и газа, одним из основных элементов которой являются нефтеперекачивающие станции (рис. 1).



Рисунок 1 – Нефтеперекачивающая станции

Нефтеперекачивающие станции (НПС) являются объектами уникальными с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС).

© Исам М. А. Абдельшафи, 2014

На них размещаются энергоустановки напряжением от 0,4 кВ до 220 кВ, мощные электродвигатели, пожаро- и взрывоопасные объекты (нефтепроводы, задвижки, резервуары и т.п.). Для управления технологическими процессами применяются современные системы на базе микропроцессорных и электронных устройств. К сожалению, в настоящее время вопросы обеспечения ЭМС на таких объектах не рассмотрены в полном объеме. Отсутствуют нормативные документы по обеспечению ЭМС на НПС, как, например, в электроэнергетике [1-3].

Основная часть. Невыполнение условий ЭМС на НПС может привести к следующим рискам: отказ оборудования, перерывы в транспортировке нефти, аварии с возникновением пожара.

Проведенный анализ показал, что основными источниками электромагнитных воздействий на системы управления, контроля и сигнализации на НПС могут быть:

- электрические и магнитные поля промышленной частоты, создаваемые силовым энергетическим оборудованием;
- удары молнии в молниеотводы на территории НПС или вблизи ее;
- электромагнитные воздействия при коммутациях малой реактивной нагрузки;
- радиочастотные электромагнитные поля от стационарных и переносных радиопередающих устройств;
- разряды статического электричества;
- переходные процессы при коротких замыканиях в электроустановках.

Наибольшую опасность представляют короткие замыкания в электроустановках напряжением выше 1 кВ и удары молнии.

В качестве приемников электромагнитных воздействий на НПС следует рассматривать следующие основные системы:

- автоматизированная система управления технологическим процессом;
- противопожарная система, включая систему датчиков сигнализации;
- система видеонаблюдения;
- система РЗА в электроустановках;
- устройства связи;
- система контроля прокачки нефти;
- автоматическая система управления насосами и задвижками.

Возможные основные риски из-за несоблюдения условий ЭМС и последствия электромагнитных воздействий представлены в табл. 1

Риски, связанные с электромагнитными воздействиями, как правило, имеют статистический характер, поэтому необходимо определять вероятность возникновения опасных ситуаций и соответственно с этим разрабатывать мероприятия по снижению уровней воздействий до допустимых значений.

Рекомендации. Для обеспечения надежной безаварийной работы НПС необходимо решать проблемы ЭМС. Для этого необходимо реализовать следующие мероприятия.

Таблица 1 – Возможные основные риски из-за несоблюдения условий ЭМС и последствия электромагнитных воздействий

Вид риска	Последствия
Отказ оборудования	Простой, потеря времени. Материальный ущерб.
Повреждение системы пожарной безопасности	Взрыв, пожар. Материальный ущерб, человеческие жертвы.
Отказ в системе АСУ ТП	Простой, потеря времени. Материальный ущерб.
Удар молнии в резервуары	Взрыв, пожар. Материальный ущерб, человеческие жертвы. Загрязнение окружающей среды

Разработать нормативно технические документы по ЭМС аналогичные [1-3].

Определить допустимые уровни электромагнитных воздействий для систем, применяемых на НПС.

Разработать методику оценки рисков из-за несоблюдения ЭМС.

Разработать типовые решения по защите особо ответственных систем от опасных электромагнитных воздействий.

Выполнить исследования электромагнитных воздействий молнии и коротких замыканий в электроустановках выше 1кВ для различных условий эксплуатации.

Заключение

Нефтеперекачивающие станции являются объектами с жесткой электромагнитной обстановкой. Наличие взрывов и пожароопасных объектов на НПС усложняет выработку решений по ЭМС. Невыполнение условий ЭМС для систем управлений, контроля и сигнализации на НПС может привести к катастрофическим последствиям. Отсутствие нормативной базы по ЭМС для таких объектов приводит к тому, что не реализуется системный подход к защите от опасных электромагнитных воздействий.

Список литературы: 1. ГОСТ Р 51317.6.5. (МЭК 61000.6.5) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний. 2. Методические указания по обеспечению ЭМС на объектах электросетевого хозяйства. СТО 56947007-29.240.044-2010. 3. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. СО 34.35.311.2004.

Bibliography (transliterated). 1. GOST R 51317.6.5. (MJeK 61000.6.5) Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Ustojchivost' k jelektromagnitnym pomехам tehniceskikh sredstv, primenjaemyh na jelektrostancijah i podstancijah. Trebovanija i metody ispytanj. Print. 2. Metodicheskie ukazanja po obespečeniju JeMS na obektah jelektrosetevogo hozjajstva. STO 56947007-29.240.044-2010. 3. Metodicheskie ukazanja po opredeleniju jelektromagnitnyh obstanovki i sovmestimosti na jelektricheskikh stancijah i podstancijah. SO 34.35.311.2004. Print.

Поступила (received) 03.10.2014

С.Г. КАРПУСЬ, мл. науч. сотрудн., ННЦ «ХФТИ», Харьков

СИСТЕМА ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕКТОРА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ЭСУ «СОКОЛ»

В 2010 г. в ННЦ «ХФТИ» был разработан источник многозарядных ионов газов (типа Пеннинга с холодными катодами и продольным извлечением ионов) для электростатического ускорителя «СОКОЛ», использование которого расширяет аналитические возможности установки для ядерно-физических методов анализа. Для согласования работы источника многозарядных ионов с ускорителем разработаны инжектор и система питания и управления. В статье представлено описание системы питания и управления инжектором многозарядных ионов ЭСУ «СОКОЛ», которая состоит из таких дистанционно регулируемых источников питания напряжений: разрядного (анодного), вытягивающего, фокусирующего, а также источников питания и управления системы напуска рабочих газов. Показано, что система питания и управления удовлетворяет предъявленным требованиям эксплуатации и обеспечивает стабильную работу инжектора многозарядных ионов газов.

Ключевые слова: инжектор многозарядных ионов, электростатический ускоритель, система питания и управления.

Введение. В 1984 г. в Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт» (ННЦ ХФТИ) был создан аналитический ядерно-физический комплекс «СОКОЛ» [1, 2, 3]. Комплекс состоит из малогабаритного электростатического ускорителя (ЭСУ) горизонтального типа с максимальным потенциалом на кондукторе 1,8 МВ, системы транспортировки пучка ускоренных ионов, магнитного масс-анализатора для разделения пучка ионов по массам и раздачи пучка по экспериментальным камерам. Первоначально для получения ионов использовался высокочастотный источник, который позволял получать однозарядные ионы газов. В дальнейшем, с целью расширения возможностей ускорительной установки за счет получения ионов с энергией больше 1,8 МэВ, была поставлена задача по разработке инжектора многозарядных ионов.

Постановка проблемы. При разработке инжектора ионов необходимо учитывать все требования, связанные с эксплуатацией его на конкретном ускорителе.

Предварительные стендовые испытания источника многозарядных ионов [4, 5] и расчеты по транспортировке пучка показали, что необходима система согласования параметров пучка, извлекаемого из источника многозарядных ионов (ИМИ), с ионно-оптическими характеристиками ускорительной трубки, то есть система инжекции.

При разработке системы инжекции пучка необходимо учитывать очень

© С.Г. Карпусь, 2014

многие реальные факторы:

- геометрические размеры ускорителя и высоковольтного электрода (кондуктора);
- положение раздаточного магнита;
- положение экспериментальных камер;
- диапазон изменения потенциала высоковольтного электрода;
- пределы изменения тока пучка ионов.

При проведении исследований на аналитической установке «СОКОЛ» возникает необходимость изменять потенциал кондуктора от 300 кВ до максимального – 1,8 МВ. Ток пучка ионов на мишени в зависимости от решаемых задач необходимо изменять от нескольких наноампер до нескольких микроампер. Изменение тока можно осуществлять регулировкой рабочих параметров ИМИ – разрядного напряжения, давления рабочего газа в источнике, вытягивающего напряжения. Изменения этих параметров приводит к изменению энергии ионов извлекаемого пучка. Так как оптические характеристики ускорительной трубки зависят от соотношения потенциала на высоковольтном электроде и энергии ионов пучка на входе в ускорительную трубку то ясно, что обеспечить качественную транспортировку пучка ионов в широком диапазоне изменения указанных параметров является достаточно сложной задачей.

Таким образом, разрабатываемая система инъекции должна удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечить постоянство энергии ионов пучка на входе в ускорительную трубку при изменении разности потенциалов «катод - экстрактор»;
- позволять регулировать энергию ионов на входе в трубку для выбора оптимальных условий транспортировки пучка.

Исходя из этих требований, было рассчитано несколько систем инъекции, которые отличались геометрическими размерами и потенциалами электродов. На основании проведенных расчетов была разработана система инъекции, состоящая из двух электродов – вытягивающего и фокусирующего.

Целью данной работы является разработка системы питания и управления инжектором многозарядных ионов, которая удовлетворяет всем выше перечисленным требованиям.

Система питания и управления инжектора многозарядных ионов

На рис.1. представлено общий вид ЭСУ «СОКОЛ» без сосуда высокого давления. На рис. 2, представлена принципиальная схема системы питания и управления инжектором, удовлетворяющая всем выше перечисленным требованиям, а на рис. 3 – инжектор многозарядных ионов с системой питания и управления на ЭСУ «СОКОЛ».

Система питания и управления состоит из следующих источников:

- источник анодного напряжения В1 предназначен для получения оптимального режима работы ионного источника для различных рабо-

- чих газов: выходное напряжение 0...5 кВ, ток нагрузки до 5 мА;
- источник вытягивающего напряжения В2 предназначен для регулировки величины тока пучка ионов, извлекаемого из ионного источника: выходное напряжение 0...16 кВ, ток нагрузки до 1 мА;
 - источник фокусирующего напряжения В3 предназначен для согласования параметров пучка с ионно-оптическими свойствами ускорительной трубкой при различных напряжениях на кондукторе ускорителя: выходное напряжение 0...18 кВ, ток нагрузки до 1 мА;
 - два идентичных источника питания (Тр8 и Тр9) биметаллических натекаелей газа N1 и N2, предназначенных для регулировки потока рабочего газа, напускаемого в источник ионов для получения оптимального режима работы источника: выходное напряжение 0...6 В, ток нагрузки до 8 А.



Рисунок 1 – ЭСУ «СОКОЛЬ» без кондуктора и сосуда высокого давления

Источники питания В1, В2, Тр8 и Тр9 изолированы от высоковольтного электрода на напряжение 20 кВ.

Источники питания В1, В2 и В3 построены на базе промышленных трансформаторов типа ТВ1-43-115-400, для получения высокого напряжения используются умножители напряжения.

Источники питания натекаелей газа N1 и N2 построены на самодельных трансформаторах.

Источники питания дистанционно управляются с пульта управления ускорителем, туда же выводится информация о режиме работы ускорителя. Кроме того, с пульта управления осуществляется выбор одного из двух рабочих газов, напускаемых в источник ионов.

Регулировка выходных напряжений источников питания осуществляется с помощью промышленных автотрансформаторов типа АРМ-6, а управление автотрансформаторами – с помощью изолирующих штанг с пульта.

Поскольку и выбор рабочего газа и регулировка потока газа, напускаемого в источник ионов, осуществляется одной штангой, была применена

релейная схема Р1 и источник питания В4, позволяющие совместить эти две функции.

Все электрооборудование на высоковольтном электроде (Тр1 и Тр2) питается от вал-генератора (разработка ННЦ ХФТИ), приводимого во вращение ленточным транспортером зарядов. Вал-генератор содержит два независимых электрогенератора 220 В, 150 Вт и 400 Гц каждый. Полная мощность, потребляемая оборудованием, установленным на высоковольтном электроде, не превышает 150 Вт.



Рисунок 3 – Инжектор многозарядных ионов с системой питания и управления, которые находятся под кондуктором ЭСУ «Сокол»

Выводы. При разработке и изготовлении системы питания и управления учитывался опыт, полученный при работе с высокочастотным источником ионов на ЭСУ «СОКОЛ». Все компоненты электрической схемы системы были ранее испытаны при работе в экстремальных условиях сосуда высокого давления (давление в диапазоне $10^3 \div 5 \cdot 10^5$ Па) и под действием тормозного излучения электронов с энергией до 1,8 МэВ. Опыт работы с инжектором многозарядных ионов на ЭСУ «СОКОЛ», показал высокую надежность системы питания и управления в течении длительного промежутка времени.

Список литературы: 1. Вергунов А. Д. Малогабаритный электростатический ускоритель на 2 МэВ горизонтального типа / А. Д. Вергунов, Ю. З. Левченко, М. Т. Новиков и др. // ВАНТ. – 1983. – № 3 (24). – (Серия: Общая и ядерная физика). – С. 13–15. 2. Ботвинов Л. П. Малогабаритный электростатический ускоритель на 2 МэВ горизонтального типа (предварительные испытания) / Л. П. Ботвинов, А. Д. Вергунов, Л. С. Глазунов и др. // ВАНТ. – 1985. – №1(22). – (Серия: Техника физического эксперимента). – С. 26-28. 3. Бондаренко В. Н. Аналитический ядерно-физический комплекс ННЦ ХФТИ «Сокол» (опыт эксплуатации и модернизация) / В. Н. Бондаренко, Л. С. Глазунов, А. В. Гончаров и др. // Труды XVI междунар. конф. по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям. – Обнинск. : ГИЦ ФЭИ, 2006. – С. 98-107. 4. Карпусь С. Г. Источник многозарядных ионов для установки «Сокол» (стендовые испытания) /

С.Г. Карпусь // ВАНТ. – 2009. – №2(93). – (Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение). – С. 198-201. 5. Glazunov L. S. Multi-charged ion source / L. S. Glazunov, A. V. Zats, S. G. Karpus, V. V. Kuz'menko, V. M. Pistryak // Problems of atomic science and technology. – 2011. – № 3 (55). – (Series: Nuclear Physics Investigations). – P.68-74.

Bibliography (transliterated): 1. Vergunov A. D., Ju. Z. Levchenko, M. T. Novikov, V. M. Pistrjak, V. E. Storizhko and S. Ja. Chekanov. "Malogabaritnyj jelektrostaticheskij uskoritel' na 2 MjeV gorizontalnogo tipa." VANT. Ser.: Obshhaja i jadernaja fizika. №3(24). 1983. 13–15. Print. 2. Botvinov L. P., A. D. Vergunov, L. S. Glazunov, A. V. Zac, Ju. Z. Levchenko, M. T. Novikov, V. M. Pistrjak, V. E. Storizhko and S. Ja. Chekanov. "Malogabaritnyj jelektrostaticheskij uskoritel' na 2 MjeV gorizontalnogo tipa (predvaritel'nye ispytanija)." VANT. Ser.: Tehnika fizicheskogo jeksperimenta. №1(22). 1985. 26-28. Print. 3. Bondarenko V. N., L. S. Glazunov, A. V. Goncharov, A. V. Zac, V. V. Kuz'menko, V. V. Levenec, A. P. Omel'nik, V. M. Pistrjak, V. I. Suhostavec and A. A. Shhur. "Analiticheskij jaderno-fizicheskij kompleks NSC KIPT "Sokol" (opyt jekspluatcii i modernizacija)." Trudy XVI mezhdunar. konf. po jelektrostaticheskim uskoritel'jam i puchkovym tehnologijam. Obninsk.: SSC IPPE. 2006. 98-107. Print. 4. Karpus S. G. "Istochnik mnogojarjadnyh ionov dlja ustanovki «Sokol» (stendovye ispytanija)." VANT. Ser.: Fizika radiacionnyh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie. №2(93). 2009. 198-201. Print. 5. Glazunov L. S., A. V. Zats, S. G. Karpus, V. V. Kuz'menko, V. M. Pistryak. "Multi-charged ion source." Problems of atomic science and technology. Ser.: Nuclear Physics Investigations. №3(55). 2011. 68-74. Print.

Поступила (received) 01.10.2014

УДК 621.317.3

В.В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;

В.И. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, директор НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;

В.Н. ДРОНОВ, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

МЕТОДИКА ГАРМОНИЗАЦИИ УРОВНЯ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С УРОВНЯМИ ВЕРОЯТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ СОПРОВОЖДАЮЩИХ МОЛНИЕВЫЙ РАЗРЯД

В статье представлена методика гармонизации уровня устойчивости системы автоматизированного контроля и управления стратегическим объектом с возможными уровнями электромагнитных помех, сопровождающих молниевый разряд. Подробно рассмотрен статистический метод расчета вероятности попадания молнии в элементы объекта, как начальный этап реализации методики. Представлен пример расчета вероятности поражения молнией модели объекта, состоящего из двух зданий, стержневого и тросового молниеотводов.

© В.В. Князев, В.И. Кравченко, В.Н. Дронов, 2014

Ключевые слова: молния, вероятность, сила тока молнии, разрядный промежуток, уровень устойчивости, стратегический объект.

Введение

Разряд молнии чрезвычайно мощное электромагнитное явление, оказывающее дестабилизирующее влияние на все системы объекта, которые содержащиеся в своей основе электронные, радиоэлектронные и электрические компоненты. Наиболее уязвимыми и опасными с точки зрения возможных негативных последствий являются системы автоматизированного контроля и управления (САКУ) объектом. Молниевый разряд вызывает импульсные электромагнитные помехи, которые распространяются в виде импульсов напряжения и тока по цепям электрического питания, проводным линиям управления, цепям связи, контурам заземления и в виде импульсного электромагнитного поля. В настоящее время согласование между возможными уровнями электромагнитных помех на конкретном объекте и уровнями устойчивости оборудования, установленного на этом объекте, не осуществляется в полной мере. Обычно, уровни устойчивости оборудования задаются родовым стандартом, например [1, 2] или стандартом на конкретный вид продукции, например [3]. Естественно, что указанные в стандартах уровни определены в результате усреднения по различным объектам. При этом не принимались во внимание особенности каждого объекта в части построения системы молниезащиты. Например, токоотвод может проходить по стене здания, внутри которого в непосредственной близости от токоотвода располагаются средства вычислительной техники. При штатной ситуации перехвата молнии молниеприемником, по токоотводу с вероятностью 50% будет протекать ток не менее 30 кА. При этом, уровень напряженности магнитного поля, создаваемого импульсом тока, на расстоянии 1 м от токоотвода будет близка к значению 5 кА/м. Максимальный уровень напряженности магнитного поля, предусмотренный стандартами, не превышает 1 кА/м, а реально сертификационные испытания проводятся на меньших уровнях. Этот пример не исчерпывает ситуации, при которых требования к устойчивости оборудования в конкретном месте его эксплуатации могут отличаться от требований стандартов, на соответствие которым испытывалось оборудование.

Поэтому, анализ возможных значений параметров электромагнитных помех, которые с определенной вероятностью могут сопровождать молниевый разряд в элементы объекта с последующей гармонизацией требований по устойчивости к устанавливаемому на объекте оборудованию является актуальной проблемой.

Методика решения проблемы

Методика определения возможных последствий удара молнии в элементы объекта включает следующие основные этапы:

1) определение расчетным методом наиболее вероятных мест удара молнии, с учетом наиболее вероятных параметров тока молнии;

2) экспериментальное исследование целостности контуров заземления на объекте и определение величины сопротивления растекания тока молнии. Разработка рекомендаций по его совершенствованию (при необходимости).

3) экспериментальное определение каналов растекания тока молнии при ударе в выбранные объекты;

4) определение коэффициентов трансформации энергии молнии в импульсы напряжения и тока, которые распространяются по гальваническим цепям и поступают на порты оборудования;

5) определение параметров напряженности электрического и магнитного поле сопровождающих молнию в местах расположения элементов САКУ с учетом экранирующих свойств зданий и сооружений;

6) экспериментальное определение устойчивости оборудования к импульсам напряжения, тока и электромагнитных полей с параметрами, определенными на предыдущих этапах;

7) определение необходимости установки дополнительных устройств защиты по портам оборудования и формирование требований к таким устройствам;

8) оценка рисков возникновения нештатных ситуаций на объекте вследствие удара молнии.

В настоящей статье изложен статистический метод расчета вероятности поражения молнией каждого здания и сооружения на объекте, а также, вероятности поражения их элементов. Этапы методики со второго по седьмой описаны в статьях и нормативных документах [4-10]. Особенно детально разработаны методы реализации этапов 2, 3 и 6, учитывающие большой опыт их практического применения. Оценку рисков возникновения нештатных ситуаций авторами предполагается описать в будущих статьях.

Статистический метод определения вероятности поражения молнией элементов объекта

Электрические станции и подстанции, газоперекачивающие станции, стартовые комплексы являются сложными техническими объектами, расположенными на большой территории, насыщенные металлическими конструкциями, расположенные на равнинной местности вдали от иных высотных сооружений. Поэтому, территория таких объектов регулярно поражается молниями. Система молниезащиты объекта формируется, как правило, на сочетании стержневых и тросовых молниеприемников. Не смотря на высокий уровень надежности таких систем, они не обеспечивают перехват всех возможных молний. Прорыв молнии на важные элементы, важные для безопасности функционирования объекта, включая САКУ, могут вызвать серьезные негативные последствия.

Современные методики оценки эффективности защиты объектов изложены в стандартах [11, 12], а также в ряде публикаций, например [13]. Эти методики построены на использовании метода «угла защиты» и «катящейся сферы» (EGM). Установлены дискретные значения для четырех уровней на-

дежности молниезащиты: 0,99, 0,97, 0,91 и 0,84. Радиус расчетной сферы зависит от требуемого уровня надежности перехвата молний с малыми значениями потенциалов лидера (малыми токами молнии).

«Малые» молнии являются наиболее трудными для перехвата, однако не менее опасными для оборудования. Система молниезащиты, спроектированная из расчета радиуса катящейся сферы 20 м, теоретически способна обеспечить перехват 99 молний из 100, ударивших в защищаемую территорию. На практике может быть иначе, поскольку не учитываются следующие важные обстоятельства:

Молния может миновать систему молниезащиты, что особенно характерно для молний с потенциалом до 10 МВ (током менее 3 кА). Таких молний по международной статистике вроде бы и не много (2 %), однако, вероятность их возникновения зависит от условий конкретного региона и может достигать 5%. Такие молнии обладают высокой разрушительной силой, поскольку могут поражать непосредственно наиболее восприимчивые элементы объекта.

Зонные методы не обеспечивают возможность детальной оценки вероятности поражения молнией объектов большой площади, поскольку, не учитывают реальных конструкций комплексов и их окружения.

Зонные методы реализовывают принцип минимума расстояния между лидером молнии и заземленным элементом. Ближе к истине принцип минимума напряжения пробивного промежутка, который учитывает встречные от элементов объекта стимеры.

В последние годы, сотрудниками НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» сформулирован новый метод оценки вероятности попадания молнии в здания о сооружения, который позволяет получить картину распределения плотности вероятности прорыва молнии по территории объекта. На данном этапе реализован вариант, в основу которого положен принцип минимума величины пробивного промежутка. Использование этого принципа, несмотря на критические замечания, позволит осуществить сертификацию программного продукта.

Суть данной модели заключается в том, что процесс ориентировки лидера молнии полагается начавшимся, когда его стримерная зона касается земли, заземленного объекта или молниеотвода. В данной модели полагается, что удар молнии произойдет в зону, которую первой достигнет один из конкурирующих искровых каналов, развивающихся в стримерной зоне от лидерного канала молнии во всех возможных направлениях к заземленным участкам, подсоединение к которым обеспечивает образование гальванически замкнутой цепи.

Вероятность возникновения силы возвратного тока молнии превышающего заданное значение представлена в стандарте [11]. Для целей данной работы используется аналитическая аппроксимация зависимости из работы [14], представленная в виде формулы (1).

$$P(I) = [(1 + (I/a)^b)^{-1}], \quad (1)$$

где $P(I)$ – вероятность того, что сила тока нисходящей отрицательной молнии превышает значение I ; I , кА – значение тока нисходящей отрицательной молнии; $a = 31$; $b = 2,6$.

Естественно, что величина тока связана с величиной потенциала облака. В свою очередь, радиус катящейся сферы определяется величиной напряжения на промежутке головка лидера - место удара. Для учета этой статистической характеристики в рамках предлагаемого метода для нисходящей отрицательной молнии использована формула (2), представленная в работе [14]. Следует отметить, что эта зависимость может быть легко изменена по мере получения новых знаний.

$$R = 6,0 \cdot I^{0,813}, \quad (2)$$

где: R , м – пробивное расстояние (радиус) в методе EGM; I , кА – сила тока молнии.

Преимущества такого подхода заключаются в следующем:

Возможно получение данных о вероятности поражения того или иного элемента объекта с любой степенью детализации.

Создание системы молниезащиты возможно с учетом оптимизации надежность-стоимость за счет детального знания наиболее вероятных зон прорыва молнии на критические элементы объекта.

При обеспечении заданного уровня надежности системы молниезащиты можно учесть статистические особенности параметров молнии в месте расположения объекта (при условии, что такие данные есть).

Численная реализация метода

Алгоритм решения задачи основан на предположении равной вероятности появления нисходящей молнии из любой точки в горизонтальной плоскости над объектом. Высота расположения плоскости определяется как сумма максимальной высоты элементов объекта и пробивного расстояния, определенного по формуле (2). Осуществляется перебор всех возможных точек пространства, формируемого с учетом указанных выше условий.

В качестве тестового объекта (рис. 1) выбран вариант сочетания двух зданий в виде параллелепипедов, отличающихся габаритными размерами, одиночного молниеотвода и тросового молниеотвода. Все размеры на рис. 1 даны в метрах.

Результаты вычислений значений условных вероятностей попадания молнии для каждого элемента сооружений на объекте представлены на рис. 2. Значения вероятностей на рисунке представлены в виде цветовой гаммы, характеризующей заданные диапазоны значений. К сожалению, этот результат не воспроизводится в полной мере на черно-белом рисунке. На рис. 3 представлены результаты для полных вероятностей в 3D отображении.

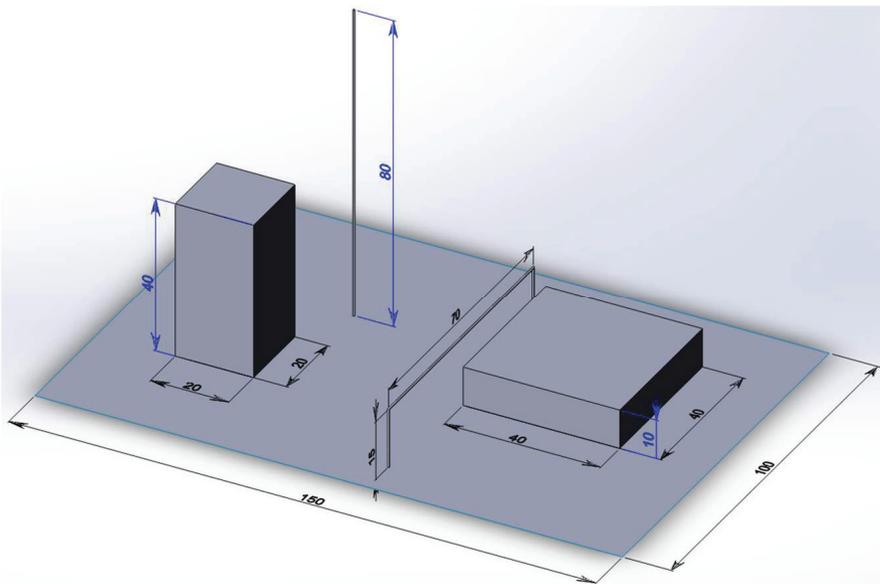


Рисунок 1 – Тестовый объект

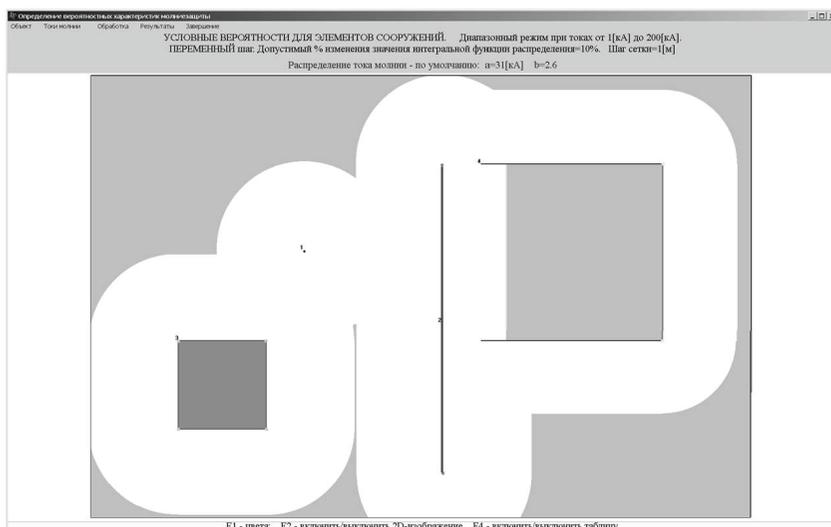


Рисунок 2 – Значения условных вероятностей попадания молнии для каждого элемента сооружений на объекте

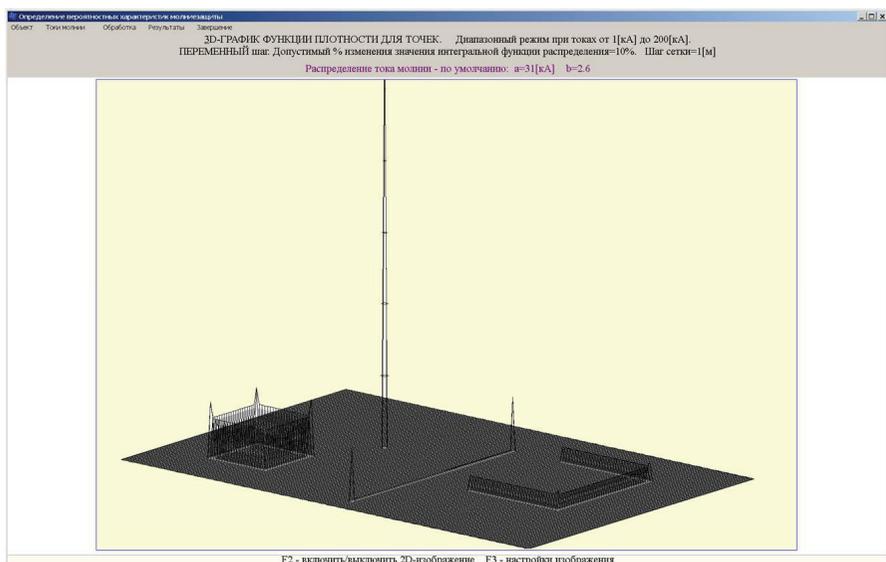


Рисунок 3 – 3D-отображение результатов вычислений полной вероятности поражения каждой точки на объекте

Выводы

Предлагаемый метод позволяет осуществить:

1. Расчет вероятности поражения молнией защищенных и незащищенных объектов с учетом реальной структуры объекта (структуры зданий и сооружений объекта, структуры системы молниезащиты).
2. Расчет вероятности поражения молнией отдельных зон объектов, в частности для объектов с большой площадью с учетом окружающих условий (высоковольтных линий передачи электроэнергии, электрифицированных железных дорог, и т.п.).
3. Расчет любого диапазона амплитуд силы тока молнии.

В дальнейшем, предлагается разработать метод расчета, реализованный в виде программного модуля, сопрягающегося с вводом данных из конструкторских программ типа ProE, расчетом распределения напряженности электрического поля с помощью программы COMSOL. Что позволит с одной стороны, автоматизировать ввод информации о геометрии сложных объектов, с другой стороны, учесть влияние встречных стримеров, которые формируются с элементов зданий и сооружений.

Совокупность результатов, полученных путем реализации описанной методики, позволяет осуществить гармонизацию уровня устойчивости САКУ объекта с возможными уровнями электромагнитных помех, сопровождающих молниевый разряд.

Результаты получены в рамках научно-исследовательской работы

(ГР №0212U005986), которая выполняется по заказу Министерства образования и науки Украины в 2013-2014 годах.

Список литературы: 1. ДСТУ ІЕС 61000-6-2:2008 Електромагнітна сумісність. Частина 6-2. Родові стандарти. Несприйнятливість обладнання в промисловому середовищі. – Держспоживстандарт України, 2008. – 10 с. 2. ДСТУ ІЕС/ТС 61000-6-5:2008. Електромагнітна сумісність. Частина 6-5. Родові стандарти. Несприйнятливість обладнання електричних станцій та підстанцій до завод. – Держспоживстандарт України, 2008. – 10 с. 3. ДСТУ EN 50130-4:2006 Системи тривоожної сигналізації. Частина 4. Електромагнітна сумісність. Стандарт на однорідну продукцію. Вимоги до стійкості складників систем. Тривоожної сигналізації про пожежу, проникнення та суспільну небезпеку. 4. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція: СОУ 31.2-21677681-19:2009. – Офіц. вид. – К. : ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2009. – 64 с. – (Нормативний документ Мінпалівенерго України. Інструкція). 5. Технічний регламент України з електромагнітної сумісності обладнання. 6. Управління закупівлями продукції. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Технічні засоби для атомних станцій. Вимоги та методи випробувань. СОУ НАЕК 029:2012. – ДП «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», 2012. – 96 с. 7. Глебов О.Ю. Определение степени влияния электромагнитных эффектов молнии на оборудование объектов энергетики / Ю.Глебов, В. В. Князев, Г.М.Колишко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 60 (1033). – С. 43–51. – Бібліогр.: 3 назв. 8. Петков А.А. Вероятность появления поражающего разряда молнии в районе расположения стержневого объекта / А.А. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 115–121. – Бібліогр.: 5 назв. 9. Колишко Г.М. Влияние конфигурации системы электродов на распределение точек поражения плоскости длинной искрой // Г.М. Колишко, П.Н. Мельников, О.С. Недзельский и др. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 60 (1033). – С. 57–70. – Бібліогр.: 6 назв. 10. Колишко Г.М. Экспериментальное исследование поражения плоскости длинной искрой // Г.М. Колишко, П.Н. Мельников, О. С. Недзельский и др. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХП», 2012. – № 21. – С. 146–153. – Бібліогр.: 9 назв. 11. ДСТУ ІЕС 62305-1:2012 Захист від блискавки. – Частина 1: Загальні принципи. (IDN, ІЕС 62305-1:2010 Protection against lightning – Part 1: General principles). 12. ДСТУ Б В.2.5-38:2008 Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд. 13. Куприенко В.М. Нормирование параметров зоны защиты стержневых молниеотводов / В. М. Куприенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХП», 2012. – № 21. – С. 169–176. – Бібліогр.: 6 назв. 14. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications 15. Lightning Electromagnetics // IET Power and Energy Series 62 // Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2012. – 917 p.

Bibliography (transliterated): 1. DSTU IEC 61000-6-2:2008 Elektromahnitna sumisnist'. Chastyna 6-2. Rodovi standarty. Nespryynatlyvyst' obladnannya v promyslovomu seredovyschci. Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2008. 10 s. Print. 2. DSTU IES/TS 61000-6-5:2008. Elektromahnitna sumisnist'. Chastyna 6-5. Rodovi standarty. Nespryynatlyvyst' obladnannya elektrichnykh stantsiy ta pidstantsiy do zavod. Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2008. 10 s. Print. 3. DSTU EN 50130-4:2006 Systemy tryvozhoynoy syhnalizatsiyi. Chastyna 4. Elektromahnitna sumisnist'. Standart na odnoridnu produktsiyu. Vymohy do stiykosti skladnykiv system. Tryvozhoynoy syhnalizatsiyi pro pozhezhu, pronyknennya ta suspil'nu nebezpeku. Print. 4. Vyprobuvannya ta kontrol' prystroyiv zazemlennya elektroustanovok. Typova instruktziya: SOU 31.2-21677681-19:2009. Ofits. vyd. K. : HRIFRE: M-vo palyva ta enerhetyky Ukrayiny, 2009. 64 s. (Normatyvnyy dokument Minpalyvenerho Ukrayiny. Instruktziya). Print. 5. Tekhnichnyy rehlament Ukrayiny z elektromahnitnoyi sumisnosti obladnannya. Print. 6. Upravlinnya zakupivlyamy produktsiyi. Sumisnist' tekhnichnykh zasobiv elektromahnitna. Tekhnichni zasoby dlya atomnykh stantsiy. Vymohy ta metody vyprobuvan'. SOU NAEK 029:2012. DP «Natsional'na atomna enerhoheneruyucha kompaniya «Enerhoatom», 2012. 96 s. Print. 7. Hlebov O.Yu. Opredelenye stepeny vlyayannya elektromahnytnykh effektov molnyi na oborudovanye obektov enerhetyky. Yu.Hlebov, V.V.

Kniaziev, H.M. Kolyushko. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. № 60 (1033). S. 43–51. Print. **8**. Petkov A.A. Veroyatnost' poyavlenyya porazhayushchego razryada molnyy v rayone raspolozhenyya sterzhnevoho ob'ekta. A.A. Petkov. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh. Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. № 21 (1064). S. 115–121. Print. **9**. Kolyushko H.M. Vlyyanye konfyhurationsy systemy elektrodov na raspredelenye tochek porazhenyya ploskosty dlynnoy yskroy. H.M. Kolyushko, P.N. Mel'nykov, O.S. Nedzel'skiy y dr. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. № 60 (1033). S. 57–70. Print. **10**. Kolyushko H.M. Eksperimental'noe issledovanye porazhenyya ploskosty dlynnoy yskroy. H.M. Kolyushko, P.N. Mel'nykov, O.S. Nedzel'skiy y dr. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh. Kharkiv: NTU «KhPI», 2012. № 21. S. 146–153. Print. **11**. DSTU IEC 62305-1:2012 Zakhyst vid blyskavky. – Chastyna 1: Zahal'ni pryntsypy. (IDN, .IEC 62305-1:2010 Protection against lightning – Part 1: General principles). Print. **12**. DSTU B V.2.5-38:2008 Inzhenerne obladyannyya budynkiv i sporud. Ulashtuvannyya blyskavkozakhystu budivel' i sporud. Print. **13**. Kupryenko V.M. Normyrovanye parametrov zony zashchyty sterzhnevyykh molnyeotvodov. V.M. Kupryenko. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh. Kharkiv: NTU «KhPI», 2012. № 21. S. 169–176. Print. **14**. CIGRE TB-549:2013 Lightning Parameters for Engineering Applications. Print. **15**. Lightning Electromagnetics. IET Power and Energy Series 62. Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2012. 917 p. Print.

Поступила (received) 23.10.2014

УДК 533.9.07

Ю. В. КОВТУН, канд. физ.-мат. наук, ННЦ ХФТИ НАНУ, Харьков;
А. Н. ОЗЕРОВ, мл. науч. сотр., ННЦ ХФТИ НАНУ Харьков;
Е. И. СКИБЕНКО, канд. физ.-мат. наук, ННЦ ХФТИ НАНУ, Харьков;
В. Б. ЮФЕРОВ, д-р техн. наук, ННЦ ХФТИ НАНУ, Харьков

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПЛАЗМЫ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

В статье дано описание электрофизической установки с высокоградиентным магнитным полем для исследования свойств плазмы отражательного разряда, что существенно отличает ее от podobных устройств, созданных и описанных в литературе ранее. Рассмотрены основные узлы и системы установки. Рассчитано распределение магнитного поля по оси и радиусу установки. Проведен тепловой расчет соленоидов. Оценена проводимость вакуумной системы. Приведено также описание систем напуска рабочего газа контролируемым способом и диагностики плазмы с указанием измерительных каналов.

Ключевые слова: отражательный разряд, плазма, магнитное поле, вакуум, соленоид, напуск газа.

© Ю. В. Ковтун, А. Н. Озеров, Е. И. Скибенко, В. Б. Юферов, 2014

Введение. Создание лабораторных плазменных установок позволяет решать актуальные задачи физики плазмы с целью дальнейшего внедрения полученных результатов в технологические циклы вновь создаваемого электрофизического оборудования. Детальное изучение физических процессов дает возможность минимизировать ошибки на стадии проектирования и изготовления оборудования, что в свою очередь приводит к экономии материальных затрат.

Как правило, в таких установках предусматривается возможность функционального разнообразия диагностических средств, используются материалы с наилучшими электро- и теплофизическими свойствами. Но главным критерием при создании лабораторных установок является получение заданных рабочих параметров при относительно невысоких материальных затратах.

Установка предназначена для создания и исследования плазмы в градиентных магнитных полях различной конфигурации и представляет собой отражательный разряд (Пеннинга) с двумя катодами и анодами. Схематическое изображение ее представлено на рис. 1а. Установка содержит следующие основные части: вакуумная разрядная камера 1; магнитная система 2, состоящая из двух катушек и системы их питания; электроразрядная система 3, состоящая из двух противоположающихся катодов и двух анодов и системы их питания; вакуумная система 4, состоящая из средств откачки вакуумной камеры; система напуска рабочего газа 5, состоящая из напускного клапана и ресивера.

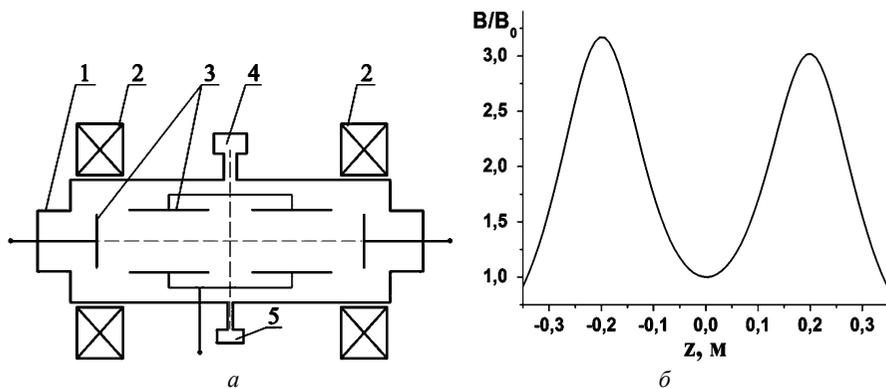


Рисунок 1 – Установка для создания плазмы отражательного разряда в высокоградиентном магнитном поле: а – ее схематическое изображение; б – распределение магнитного поля вдоль аксиальной оси: 1 – вакуумная разрядная камера; 2 – магнитные катушки; 3 – система электродов; 4 – вакуумная система; 5 – система напуска рабочего газа

Описание разрядной вакуумной камеры. Разрядная камера представляет собой полый цилиндр из нержавеющей стали, объемом 13,86 дм³, с тол-

щиной стенки 1 мм, длиной 648 мм, внутренним диаметром 185 мм. Камера установлена на рабочем столе в вертикальном положении. В центральной части камеры по длине окружности расположены патрубки для: вакуумной откачки, напуска рабочего газа, ввода средств диагностики плазмы. На торцах камеры установлены фланцы из органического стекла, на которых размещены катоды, а также симметрично относительно центра камеры установлены катушки, формирующие магнитное поле заданной конфигурации.

Описание магнитной системы. Магнитная система установки состоит из двух соленоидов, центры которых находятся на расстоянии 0,4 м друг от друга и, соответственно, удалены от среднего сечения вакуумной камеры на 0,2 м.

Соленоиды изготовлены в виде катушек, обмотки которых расположены в каркасах из нержавеющей стали и выполнены медным проводом с эмалевой изоляцией диаметром 2,2 мм. Каждый слой обмотки изолирован стеклотентой. Обмотка скреплена несколькими слоями стеклотенты и картона, на которой был наложен бандаж из нержавеющей проволоки. Охлаждение соленоидов воздушное.

Расчет геометрических параметров, индуктивности и сопротивления катушки производился по методике, описанной в [1, 2]. Параметры изготовленных соленоидов представлены в табл. 1.

Таблица 1– Основные параметры соленоидов

Параметры	Соленоиды	
	№ 1	№ 2
Внутренний диаметр обмотки, $2a_1$, м	0,194	0,194
Наружный диаметр обмотки, $2a_2$, м	0,32	0,33
Длина обмотки, $2b$, м	0,07	0,07
Безразмерный внешний диаметр соленоида, $\alpha=2a_2/2a_1$	1.649	1.701
Безразмерная высота соленоида $\beta=2b/2a_1$	0.361	0.361
Число слоев	31	31
Число витков N	931	899
Объем соленоида, V , м ³	$3.561 \cdot 10^{-3}$	$3.918 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент заполнения, λ	0.745	0.69
Длина проводника, l , м	751.679	739.964
Масса проводника, m , кг	23.588	24.047
Индуктивность, L , Гн	0.101	0.091
Сопротивление, R , Ом	3.671	3.614

При изменении температуры обмотки катушки также изменяется и ее активное сопротивление. Учет влияния температуры на сопротивление катушек производился согласно уравнения [3]:

$$\frac{R_T}{R_0} = 1 + \alpha_{0,T} \Delta T, \quad (1)$$

где R_0 и R_T – соответственно, сопротивление проводника при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и текущей температуре, Ом (для меди в интервале температур $0\div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $R_T/R_0 = 1,426$); $\alpha_{0,T}$ – температурный коэффициент сопротивления, K^{-1} (для меди в интервале температур $0\div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\alpha_{0,100} = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \Delta T} = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}$); ΔT – изменение температуры, К.

Результаты расчета представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Измерение сопротивления катушек производилось мостом постоянного тока типа МО-62 (класс 0,1) при температуре окружающего воздуха $19\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сравнение результатов измерения и расчетов, представленных в табл. 2, показывает, что они находятся в хорошем согласии между собой.

Таблица 2– Результаты расчета и измерения активного сопротивления обмотки соленоида при изменении температуры

Параметр	Значение	
	№ 1	№ 2
$R(\text{расчет } 0\text{ }^{\circ}\text{C}), \text{ Ом}$	3.383	3.33
$R(\text{расчет } 18\text{ }^{\circ}\text{C}), \text{ Ом}$	3.642	3.585
$R(\text{измерение } 19\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}), \text{ Ом}$	$3,641\pm 0,007$	$3,578\pm 0,007$

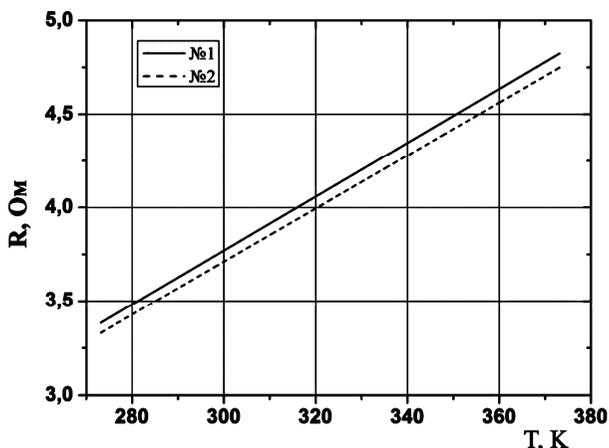


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления катушек от температуры.

Магнитная индукция в центре осесимметричной катушки определяется из соотношения [4]:

$$B_0 = \frac{\mu_0 J_\phi}{2} 2b \ln \left(\frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + b^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + b^2}} \right), \text{ Тл} \quad (2)$$

где μ_0 магнитная проницаемость вакуума, $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, J_ϕ – средняя плотность тока по сечению катушки, определяемая как:

$$J_{\phi} = \frac{IN}{S} = \frac{IN}{2b(a_2 - a_1)}, \text{ A/m}^2 \quad (3)$$

где I – ток, А; S – площадь поперечного сечения катушки, м².

Распределение индукции B_z магнитного поля на оси z катушки прямоугольного сечения со средней плотностью тока J_{ϕ} определяется как [4]:

$$B_z = \frac{\mu_0 J_{\phi}}{2} \left[(b-z) \ln \left(\frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (b-z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (b-z)^2}} \right) + (b+z) \ln \left(\frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (b+z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (b+z)^2}} \right) \right], \text{ Тл.} \quad (4)$$

Магнитная система способна формировать магнитные поля различной конфигурации. Конфигурация с градиентом магнитного поля (типа «магнитный берег»), создается путем включения одной из катушек 1 или 2. Пробочная конфигурация магнитного поля создается путем последовательного включения катушек, причем ток течет по обмоткам в одном направлении.

Результаты расчета распределения индукции магнитного поля по оси установки в случае конфигурации поля типа «магнитный берег», представлены на рис. 3. Магнитная индукция в центре катушки составляет 0,05 Тл при токе 10 А.

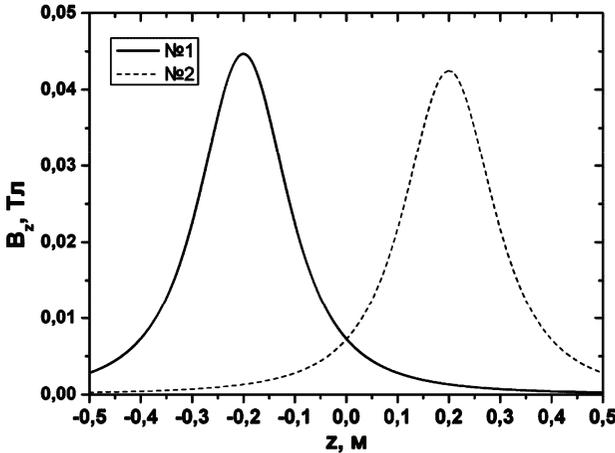


Рисунок 3 – Распределение продольной составляющей индукции магнитного поля B_z по оси установки, при включении катушки 1 или 2 при токе $I = 10$ А

При работе магнитной системы в режиме пробочной конфигурации распределение магнитного поля по длине и радиусу магнитной системы рассчитывалось методом суперпозиций полей от каждой катушки [4]. Результаты расчета представлены на рис. 1, б в виде отношения B/B_0 , где B_0 – значение магнитной индукции в центре установки; B – значение магнитной индукции в текущей координате: $B = (B_z^2 + B_r^2)^{0,5}$; B_z , B_r – продольная и радиальная со-

ставляющая магнитной индукции.

В результате такой коммутации катушек формируется магнитное поле с двумя пробками. Расстояние между пробками 405 мм. Пробочное отношение в магнитной пробке № 1 и № 2 составило соответственно $R_{B1} = 3,17$ и $R_{B2} = 3,02$.

Ввиду различия параметров соленоидов (табл. 1), пробочное отношение R_{B1} превосходит R_{B2} на 4,97 %. Магнитная постоянная $B/I = 0,00145$ Тл/А.

Наряду с расчетом было проведено измерение магнитного поля по оси и радиусу установки. Измерения проводились с помощью измерителя магнитной индукции типа Ш1-8. Ток через магнитную систему измерялся через шунт постоянного тока типа 75ШСМ3-50-0,5 (класс 0,5) и вольтметра типа В7-27А. Результаты расчетов и измерений представлены на рис. 4-6. Как видно из рисунков, результаты расчета находятся в хорошем согласии с выполненными измерениями. В центральном сечении установки ($z = 0$) доминирует продольная составляющая магнитной индукции B_z , многократно превышающая радиальную составляющую B_r . Максимальное измеренное значение магнитной индукции наблюдалось по центру магнитной катушки №1 ($z = -0.2$ м) и составило 0,16 Тл при токе 40 А.

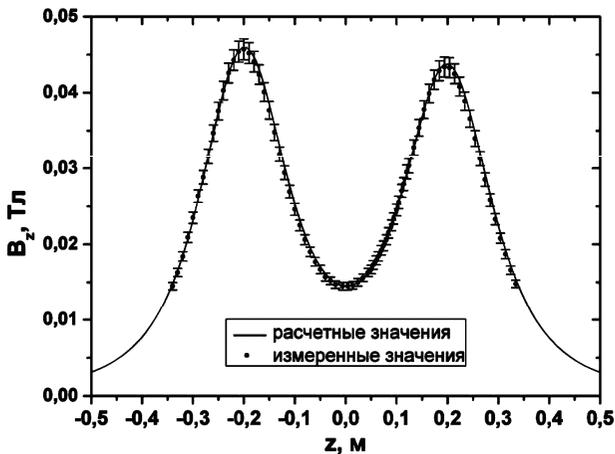


Рисунок 4 – Распределение продольной составляющей индукции магнитного поля B_z по оси установки, в режиме пробочной конфигурации, ток $I = 10$ А

Питание магнитной системы осуществляется от источника постоянного напряжения, которое может варьироваться в пределах от 10÷300 В. Потребляемая мощность соленоидов, формирующих магнитное поле пробочной конфигурации, при номинальном рабочем напряжении питания 300 В, составляет 12,35 кВт. При этом значение магнитной индукции в пробке № 1 составляет 0,184 Тл, в пробке № 2 0,175 Тл.

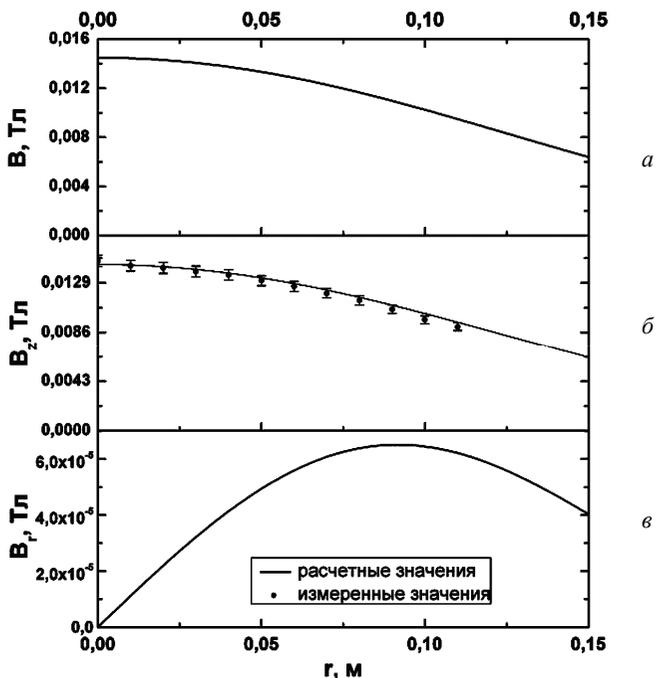


Рисунок 5 – Распределение магнитной индукции по радиусу установки, $z = 0$, ток $I = 10$ А: *a* – модуля вектора; *б* – продольной составляющей; *в* – радиальной составляющей

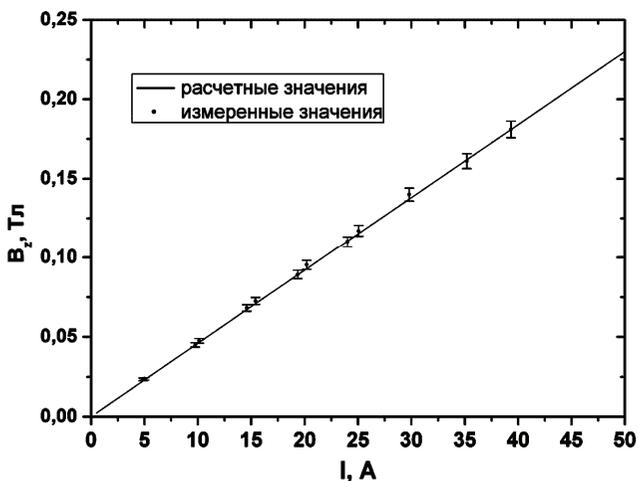


Рисунок 6 – Зависимость продольной составляющей магнитной индукции в точке $z = -0,2, r = 0$ от величины тока

Поскольку катушки магнитной системы не имеют принудительной системы охлаждения, то представляет интерес расчет времени нагрева катушек. В данном случае можно рассматривать процесс нагрева катушек как нагрев тела с внутренним источником теплоты, то есть с объемным тепловыделением [5]. Общее количество теплоты, идущее на повышение температуры тела, равно:

$$Q = Cm\Delta T, \text{ Дж} \quad (5)$$

где C – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; m – масса тела, кг; ΔT – изменение температуры тела $\Delta T = T_2 - T_1$, К.

Учитывая, что $Q = I^2 R t$ приведем уравнение (5) к виду:

$$t = \frac{Cm\Delta T}{I^2 R}, \text{ с} \quad (6)$$

где t – время нагрева, с.

Учитывая значение температуростойкости обмоточного провода, принимаем максимальную допустимую температуру 363,15 К. Начальную температуру принимаем 293,15 К и, соответственно, $\Delta T = 70$ К. Удельная теплоемкость меди при 20 °С равна 381,042 Дж/кг·К [6]. Результаты расчета, выполненные для обеих катушек, показывают, что времена нагрева катушек имеют близкие значения, поэтому дальнейшие расчеты будут проводиться для катушки № 1.

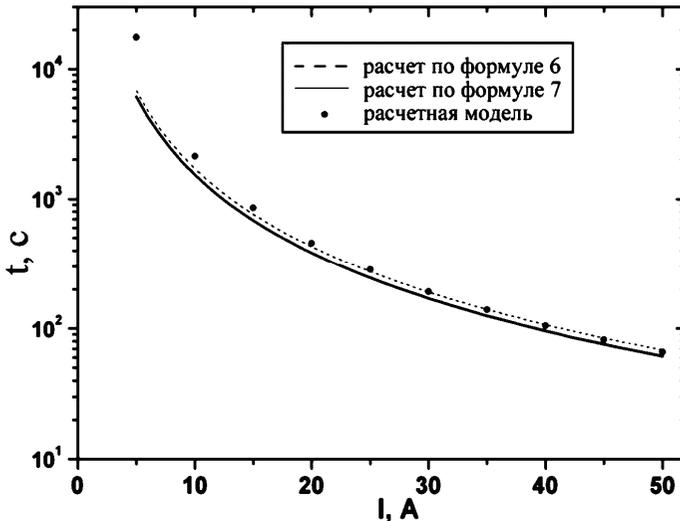


Рисунок 7 – Зависимость времени нагрева катушки при постоянном температурном градиенте $\Delta T = 70$ К от тока

Учитывая изменение от температуры теплоемкости и сопротивления выражение (6) примет вид:

$$t = \frac{m}{I^2} \int_{T_1}^{T_2} \frac{c(T)}{R(T)} dT, \text{ с.} \quad (7)$$

В реальных условиях происходит также естественное охлаждение катушек, где теплообмен за счет теплопроводности происходит от обмотки к каркасу катушки, а от каркаса к окружающей среде за счет конвекции и излучения. Поэтому для расчета температуры катушки была построена двухмерная модель, учитывающая теплообмен с каркасом и его охлаждение за счет излучения. Теплоемкость и теплопроводность материалов была взята из [6-8]. Коэффициент черноты принят 0,98. Результаты расчета представлены на рис. 7. Как видно из рис. 7, при токах менее 10 А теплоотвод от обмотки уже начинает играть заметную роль и его необходимо учитывать при расчете времени нагрева катушки. Расчетное время нагрева при токах менее 15 А составляет десятки минут; для полноты описания теплового режима магнитной системы требуется также учитывать конвективное охлаждение. При токах 20÷50А расчетное время нагрева составляет, соответственно, от 7 до 1 мин, что вполне достаточно для проведения исследований свойств и параметров плазмы.

Описание электроразрядной системы. Электроразрядная система состоит из двух холодных катодов в форме дисков диаметром 80 мм, толщиной 3 мм и двух анодов в виде полых цилиндров с внутренним диаметром 95 мм, высотой 120 мм, толщиной стенки 1,5 мм. Катоды располагаются на торцах камеры и выполнены в двух вариантах: медные и титановые. Аноды, из нержавеющей стали, между собой располжены соосно на расстоянии 60 мм и установлены коаксиально относительно вакуумной камеры.

Питание электроразрядной системы осуществляется от источника постоянного напряжения 1 кВ. Разрядный ток до 1 А.

Описание вакуумной системы. Основные узлы вакуумно-откачной системы представлены на рис. 8. В качестве форвакуумного насоса используется пластинчато-роторный насос типа 2НВР-5ДМ (11) с быстротой действия 5 л/с и предельным остаточным давлением $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ($9,75 \cdot 10^{-5}$ Торр). Для получения высокого вакуума используется диффузионный паромасляный вакуумный насос (1) типа 7НВДМ – 160 с быстротой действия 700 л/с и предельным остаточным давлением $6,6 \cdot 10^{-7}$ Па ($5 \cdot 10^{-7}$ Торр) с механической водоохлаждаемой ловушкой (2), а также криоконденсационный насос (4). Измерение остаточного давления в диапазоне $1,013 \cdot 10^5 \div 133,33$ Па ($760 \div 1$ Торр) производится деформационным вакуумметром (13); в диапазоне $666,65 \div 2 \cdot 10^{-8}$ Па ($5 \div 1,5 \cdot 10^{-10}$ Торр) ионизационно-термопарными вакуумметрами типа ВИТ-2, ВИТ-3, ионизационным вакуумметром типа ВИ-14. Использование термопарных преобразователей типа ПМТ-2 и ПМТ-4М (5, 9, 14) позволяет измерять давление в диапазоне $666,65 \div 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па ($5 \div 1 \cdot 10^{-4}$ Торр), ионизационных преобразователей типа ПМИ-2, ПМИ-27, ПМИ-10-2, (7, 8, 17) в диапа-

зоне $133,33 \div 2 \cdot 10^{-8}$ Па ($1 \div 1,5 \cdot 10^{-10}$ Торр).

Вакуумные агрегаты подсоединяются через торцевые патрубки круглого и эллиптического сечения. Наименьшая проводимость вакуумной системы приходится на участок трубопровода с эллиптическим сечением длиной 45 мм, малой и большой осью эллипса 14 и 76 мм. Пропускная способность этого участка составила [9]: в молекулярном режиме 55 л/с при числе Кнудсена $K_n = 0,33$; в вязкостном режиме 408 л/с при $K_n = 0,01$.

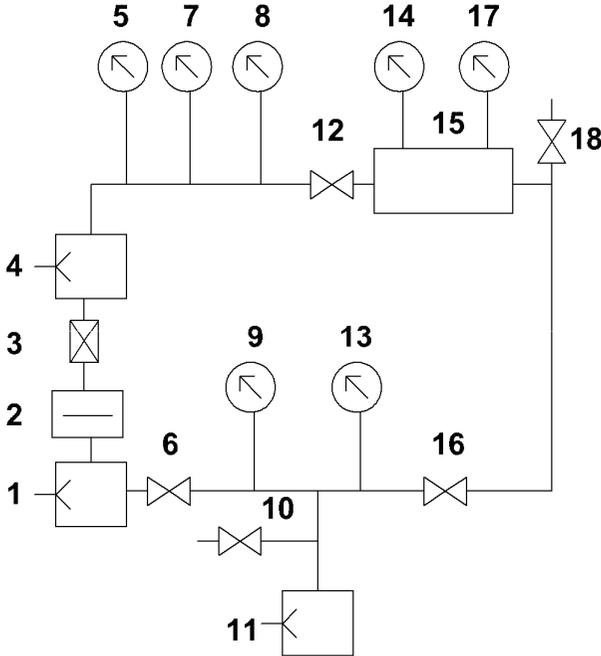


Рисунок 8 – Схема вакуумно-откачной системы: 1 – диффузионный насос; 2 – ловушка; 4 – криоконденсационный насос; 3, 6, 10, 12, 16, 18 – клапан; 5, 9, 14 – термопарный преобразователь; 7, 8, 17 – ионизационный преобразователь; 11 – механический насос; 13 – деформационный преобразователь; 15 – вакуумная камера

Описание системы напуска рабочего газа. Система напуска рабочего вещества в вакуумную разрядную камеру осуществляет напуск газа в область формирования плазмы. Расход газа регулируется с целью получения заданных плотностей частиц для образования плазмы и поддержания ее необходимых параметров. Система напуска снабжена запорно-регулирующей арматурой, измерителями давления широкого диапазона.

Напуск рабочего газа аргона, гелия производится клапаном КМПН-10, работающего как в стационарном так и в импульсном режиме. Клапан работает от импульсного источника питания, принцип действия которого основан

на разряде предварительно заряженного конденсатора на обмотку электромагнита клапана. Так как клапан имеет большую проводимость, 0,6 л/с при атмосферном давлении, то напуск газа в источник производился из дополнительной камеры с пониженным давлением.

Система диагностики плазмы. Экспериментальная техника, используемая при диагностике плазмы, чрезвычайно разнообразна и опирается на весь технический арсенал современной физики. При выборе средств диагностики необходимо руководствоваться, прежде всего, необходимой точностью измерения и функциональной возможностью установки диагностического оборудования в разрядную камеру. Исходя из этого, для диагностики плазмы в установке предлагается использовать:

- измерительные шунты постоянного тока и резистивно-емкостной делитель напряжения, для измерения параметров электрической цепи;
- двойной зонд Ленгмюра, для измерения температуры и плотности плазмы;
- СВЧ-интерферометр, для измерения средней плотности плазмы;
- рефлектометр-коррелятор для исследования флуктуаций плотности плазмы;
- оптические методы, для измерения интенсивности и длительности светового излучения плазмы;
- спектрометр, для определения элементного и зарядового состава плазмы.

Заключение. Электрофизическая установка для создания плазмы в высокоградиентных магнитных полях при низких давлениях газа представляет собой единый комплекс взаимосвязанных систем, работа которых позволяет реализовать актуальные научно-технические задачи для отражательного разряда. Результаты исследования дополняют теорию и практику исследуемого разряда именно в высокоградиентном магнитном поле.

Список литературы: 1. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы / Г. Брехна [пер. с англ. под ред. В. Р. Карасика]. – М.: Мир, 1976 – 704 с. 2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные поля / Г. Кнопфель [пер. с англ. под ред. Ф. А. Николаева, Е. П. Свириденко]. – М.: Мир, 1972 – 382 с. 3. Линеверг Ф. Измерение температур в технике. Справочник / Ф. Линеверг [пер. с англ. под ред. Л. А. Чарихова]. – М.: Металлургия, 1980 – 544 с. 4. Алиевский Б. Л. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек: Справочник / Б. Л. Алиевский, В. Л. Орлов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 112 с. 5. Болгарский А. В. Термодинамика и теплопередача / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин // – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с. 6. Chase M. W., Jr. NIST-JANAF Thermochemical tables. / M. W. Chase, Jr. // Journal of Physical and Chemical Reference Data. Monograph № 9. – 1998. – P. 1–1951. 7. Ho C. Y. Thermal conductivity of the elements: A comprehensive review / C. Y. Ho, R. W. Powell, P. E. Liley // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1974. – Vol. 3, Supplement №1. – P. 1–796. 8. Бабичев А. П. Физические величины. Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. 9. Фролов Е. С. Вакуумная техника. Справочник / Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев, А. Т. Александрова. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с.

Bibliography (transliterated): 1. Brexna, G. "Sverxprovodyashhie magnitnye sistemy." Moskva: Mir,

1976. Print. 2. Knopf, G. "Sverxsilnye impulsnye polya". Moskva: Mir, 1972. Print. 3. Lineveg, F. "Izmerenie temperatur v tekhnike. Spravochnik". Moskva: Metallurgiya, 1980. Print. 4. Alievskij, B. L. and Orlov V. L. "Raschet parametrov magnitnykh polej osesimmetrichnykh katushek: Spravochnik". Moskva: Energoatomizdat, 1982. Print. 5. Bolgarskij, A. V., G. A. Muxachev and V. K. Shhukin. "Termodinamika i teploperedacha". Moskva: Vysshaya shkola, 1975. Print. 6. Chase, M. W. "NIST-JANAF Thermochemical tables". Journal of Physical and Chemical Reference Data. Monograph № 9 – 1998. – P. 1–1951. Print. 7. Ho, C. Y., R. W. Powell and P. E. Liley. "Thermal conductivity of the elements: A comprehensive review". Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1974. – Vol. 3, Supplement №1. – P. 1–796. Print. 8. Babichev, A. P., N. A. Babushkina, A. M. Bratkovskij. "Fizicheskie velichiny. Spravochnik". Moskva: Energoatomizdat, 1991. Print. 9. Frolov, E. S., V. E. Minajchev and A. T. Aleksandrova. "Vakuumnaya tekhnika. Spravochnik". Moskva: Mashinostroenie, 1985. Print.

Поступила (received) 02.10.2014

УДК 519.2

Г.М. КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
О.С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ, вед. инженер, НТУ «ХПИ»;
Е.Г. ПОНУЖДАЕВА, зав. лаб., НТУ «ХПИ»;
А.В. ПЛИЧКО, мл. научн. сотр., НТУ «ХПИ»;
Д.И. КОВАЛЕВ, ассистент, НИУ «МЭИ», Москва, Россия

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА УСТРОЙСТВА БЛОКИРОВКИ ОПЕРАТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ УБОП

В статье представлена конструкция разработанного опытного образца устройства блокировки оперативных переключений УБОП. Устройство предназначено для работы в системе обеспечения блокировок безопасности коммутирующих аппаратов высокого напряжения энергообъектов. Описана работа механизма УБОП с электромагнитным приводом. Представлены результаты экспериментальных исследований термодинамических показателей работы УБОП в длительном режиме включения электромагнитного привода механизма блокировки.

Ключевые слова: устройство блокировки оперативных переключений, замковый механизм, электромагнит, температура нагрева.

Введение. Разработка нового комплекса электрооборудования (КЭО), включающего в себя устройства блокировки несанкционированных оперативных переключений коммутирующего электрооборудования (разъединители, заземлители и т.п.), потребовало создание новых устройств блокировки, в частности – блок-замков с электромагнитным механизмом управления. Устройства блокировки оперативных переключений (УБОП) должны быть адаптированы к разрабатываемому КЭО с «интеллектуальным» управлением, по-

© Г.М. Колиушко, О.С. Недзельский, Е.Г. Пон, А.В. Пличко, Д.И. Ковалев, 2014

вышающим безопасность оперативных работ и надежность работы комплексов электрооборудования в целом.

При использовании серийно выпускаемого блок-замка ЗБ-1, операции по деблокированию переключающих приводов электрооборудования осуществляются оператором непосредственно на месте установки оборудования с помощью электромагнитного (КЭЗ-1М) и магнитного (КМ-1М) ключей [1] и не отвечают требованиям к КЭО нового поколения.

В [2] описано вновь разработанное УБОП, позволяющее управлять электромагнитным механизмом блокировки и фиксировать состояние «открыто» - «закрыто» системой управления оперативными блокировками безопасности (ОББ). Анализ конструкции опытного образца УБОП [2] и экспериментальные исследования характеристик, определяющих его работоспособность и соответствие заданным условиям эксплуатации, показали ряд недостатков, в частности, определенную сложность механизма фиксации запирающего штока блок-замка, что понижает надежность работы при длительной эксплуатации, и недопустимый перегрев корпуса электромагнита механизма фиксации штока.

Проведенные работы по устранению недостатков описанной в [2] конструкции УБОП определили конструкцию описанную ниже, в которой в значительной мере устранены недостатки предыдущей разработки.



Рисунок 1 – Общий вид опытного образца устройства блокировки оперативных переключений УБОП

Описание разработки. Специалистами Национального исследовательского университета «МЭИ» (г. Москва) и Национального технического университета «ХПИ» (г. Харьков) разработан и изготовлен опытный образец УБОП, предназначенный для работы в составе КЭО ОББ нового поколения.

Общий вид образца УБОП представлен на рис. 1.

Основные технические характеристики УБОП представлены в табл. 1.

Присоединительные размеры и элементы крепления к электрооборудованию соответствуют указанным в [1].

Конструкция механизма УБОП представлена на рис. 2.

Таблица 1 – Основные технические характеристики УБОП

Наименование параметра или характеристики	Значение
1. Рабочий ход запирающего штока, мм	14_{-1}^{+2}
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 электромагнита, В (постоянного тока).	24 ± 4
5. Ток в катушке электромагнита, А, не более	0,35
6. Габаритные размеры, мм, не более	$\varnothing 70 \times 150$
7. Масса, кг, не более	0,7

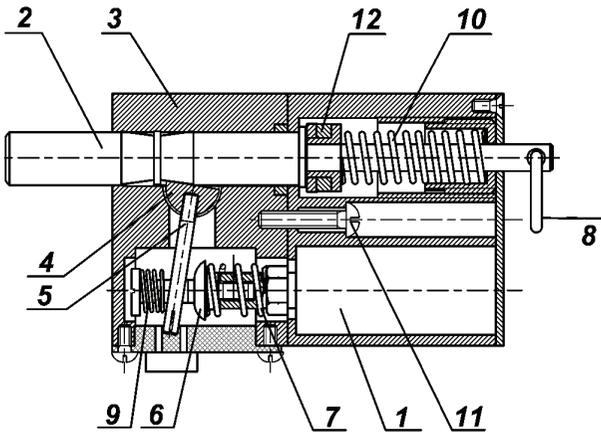


Рисунок 2 – Конструкция механизма УБОП: 1 – электромагнит; 2 – шток; 3 – корпус; 4 – поворотный клин; 5 – рычаг; 6 – толкатель; 7 – пружина; 8 – кольцо; 9 – пружина; 10 – пружина возвратная; 11 – винт; 12 – кольцевой магнит

Механизм УБОП работает следующим образом.

В начальном положении, соответствующем состоянию «закрыто» (катушка электромагнита ЭМ (1) обесточена) шток (2) максимально выдвинут из корпуса (3) и зафиксирован в этом положении поворотным клином (4) с

рычагом (5). Рычаг (5) подпирается толкателем (6) с пружиной (7).

При подаче питания на катушку ЭМ сердечник ЭМ втягивается, переводя поворотный клин в промежуточное положение, освобождающее свободу перемещения штока (2) в осевом направлении в положение «открыто». Перемещение штока осуществляется оператором посредством кольца (8), закрепленного на штоке (2). При достижении штоком положения «открыто» пружина (9) поворачивает рычаг (5) с поворотным клином (4) в положение заклинивания обратного хода штока (2).

После снятия напряжения питания ЭМ толкатель (6) поворачивает рычаг (5), освобождая осевой ход штока, и он под действием возвратной пружины (10) возвращается в положение «закрыто».

Корпус (3) выполнен из дюралюминия, из двух частей, скрепляемых винтами (11). На штоке (2) размещен кольцевой магнит (12), обеспечивающий срабатывание встроенного в корпус герконового реле при осевом перемещении штока. Контакты герконового реле включены в цепь индикации состояния «открыто» - «закрыто» УБОП.

Представленная на рисунке 2 конструкция механизма УБОП имеет преимущества по сравнению с предыдущей разработкой [2], заключающиеся в более простом механизме фиксации положения штока, имеющего один поворотный клин, что повышает технологичность изготовления и надежность эксплуатации УБОП. Конструкция позволяет закрепить корпус УБОП на неподвижной части привода коммутирующего аппарата двумя винтами (М5), проходящими в осевом направлении корпуса, посредством вкручивания их со стороны передней крышки корпуса, что является несомненным преимуществом перед аналогом [2].

Экспериментальные исследования. В результате проведенных предварительных испытаний ранее разработанного опытного образца УБОП [2] было установлено, что принятое конструктивное решение не обеспечивает достаточного теплоотвода корпуса электромагнита (ЭМ) замкового механизма. Несмотря на относительно небольшую тепловую мощность, выделяемую в катушке ЭМ при протекании постоянного тока (до 7 Вт при напряжении питания 24 В), при недостаточном теплоотводе от корпуса (элементов) ЭМ в замкнутом пространстве корпуса УБОП нагрев ЭМ при длительном (более 30 мин.) времени включенного состояния может нарастать до 70 °С и более, что недопустимо.

Согласно техническим характеристикам электромагнита EM-CS1949Z-24, примененного в конструкции описываемого УБОП, при номинальном напряжении питания катушки ЭМ (24 В) время работы в условиях естественного конвективного охлаждения при температуре окружающего воздуха 20 °С ± 4 °С неограничено. При этом температура корпуса достигает 45 °С, что подтверждено экспериментально.

При отсутствии конвективного охлаждения и размещения ЭМ в замкну-

том пространстве корпуса УБОП, выполненного из низкотеплопроводных материалов (пластиков) [2] возможен нагрев ЭМ до недопустимых температур (более 70 °С).

Для улучшения теплоотдачи корпуса ЭМ в описываемой конструкции опытного образца УБОП цилиндрический корпус ЭМ помещен в цилиндрическое отверстие металлического корпуса УБОП (см. рис. 1). Для улучшения теплоотдачи зазор между поверхностями корпусов заполнен теплопроводящей пастой КТП-8. Торец корпуса ЭМ плотно прикреплен к корпусу УБОП резьбовым соединением, обеспечивающим максимальный тепловой контакт.

Проведены экспериментальные исследования термодинамических показателей работы УБОП в длительном режиме включения питания катушки ЭМ. Результаты представлены графиками изменения температуры корпуса УБОП и корпуса ЭМ на рис. 3.

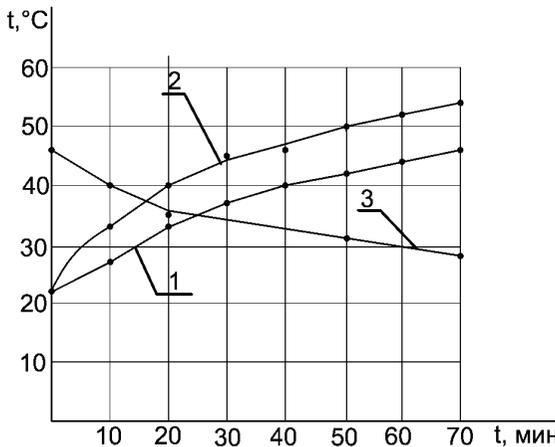


Рисунок 3. Графики зависимости температуры от времени: 1 – нагрев корпуса УБОП; 2 – нагрев корпуса ЭМ; 3 – охлаждение корпуса УБОП

Измерение температуры осуществлялось термопарой прибора RD700, которая укреплялась на поверхности корпуса посредством теплопроводящей пасты КТП-8. Температура корпуса УБОП измерялась на наружной поверхности на расстоянии 20 мм от торца корпуса; температура ЭМ измерялась на торцевой поверхности цилиндрического корпуса, на имеющего теплового контакта с корпусом УБОП.

Как следует из анализа графиков рис. 3, температура корпуса УБОП через 60 минут достигает $t^{\circ} = 42^{\circ}\text{C}$, а температура корпуса ЭМ достигает $t^{\circ} = 52^{\circ}\text{C}$. При этом корпус УБОП, изготовленный из металла (дюралюминий), находился в условиях охлаждения естественной конвекцией окружающего воздуха комнатной температуры ($20^{\circ}\pm 2^{\circ}$) °С. Напряжение питания катушки ЭМ составляло 24 В постоянного тока величиной 0,25 А (ток при росте тем-

пературы менялся от 0,26 А до 0,24 А).

Средняя выделяемая тепловая мощность составляла 7 Вт.

Анализ температурных показателей позволяет сделать вывод о том, что для описываемой конструкции опытного образца УБОП температурный режим работы электромагнита является допустимым. В дальнейших разработках опытных образцов и проведении контрольных испытаний не исключено введение в эксплуатационную документацию временных ограничений нахождения УБОП в режиме включенного питания катушки ЭМ при определенных условиях эксплуатации (превышении температуры окружающего воздуха 35 °С).

Выводы. Разработанный опытный образец УБОП обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами и предыдущими разработками. В работе представлена конструкция и термодинамические показатели экспериментальных исследований работы УБОП в длительном режиме. Обоснована необходимость применения конструктивных решений по обеспечению максимальной теплопередачи корпуса ЭМ к теплопроводящему корпусу УБОП, имеющему конвективное охлаждение в окружающей среде.

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. – Союзтехэнерго, 1979. 2. Устройство блокировки оперативных переключений (УБОП) комплекса электрооборудования нового поколения / Г.М. Колишко, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуздаева, Р.К. Борисов, С.И. Хренов, Д.И. Ковалев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 66-71.

Bibliography (transliterated): 1. Instrukcija po eksploatacii operativnyh blokirovok bezopasnosti v raspredelitelnyh ustrojstvah vysokogo naprjzhenija. RD 34.35.512. Sojuztehenergo, 1979. Print. 2. Ustrojstvo blokirovki operativnih perekljuchenij (UBOP) kompleksa elektrooborudovanija novogo pokolenija. G.M. Koliushko, O.S. Nedzelskyi, H.G. Ponuzhdayeva, R.K. Borisov, S.I. Khrenov, D.I. Kovalev. Visnik NTU "KhPI". Serija: Tehnika ta elektrophizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. N21 (1064). P. 66-71. Print.

Поступила (received) 24.10.2014

Ю.С. НЕМЧЕНКО, гл. метролог, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
Н.Д. ЖИВОТОВ, вед. инженер, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
А.И. САРАЕВ, науч. сотрудник, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
Т.Н. ОСТРОВЕРХ, вед. инженер, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА КОНДУКТИВНЫХ РАДИОПОМЕХ

Описана современная методика измерения эмиссии тока радиопомех от бортового авиационного оборудования с помощью токосъемника ТС-А, созданного и прокалиброванного в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния». Эта методика позволяет быстро и эффективно определить: выполняются ли в испытываемом изделии требования по эмиссии токов радиопомех по всем действующим в Украине нормативным документам в полном объеме. Требования стандарта ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007 являются обязательными к выполнению в Украине.

Ключевые слова: эмиссия тока радиопомех, токосъемник, бортовое авиационное оборудование.

Вступление. Выполнение требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) сейчас является обязательным при проектировании и разработке любых технических средств (ТС), содержащих в своем составе электрические, электронные или радиокомпоненты. Особенно остро выполнение этих требований предъявляется к ТС повышенной опасности, например, для ТС атомных электростанций, летательных аппаратов и др. Усугубляется это обстоятельство еще и тем, что у этих ТС очень насыщенная компоновка и разветвленная и протяженная информационная и энергетическая кабельная сеть. Именно из-за этого облегчается проникновение различного рода радиопомех во внутрь ТС, что может вызвать сбои или даже отказы отдельных ТС.

Именно благодаря этим фактам в мире выработаны жесткие требования как по стойкости ТС к внешним помехам, так и по эмиссии собственных радиопомех.

Основная часть. В данной статье мы ограничимся только одним из видов радиопомех, а именно, токами кондуктивных радиопомех, которые генерируются ТС (конкретно бортовым авиационным оборудование – БАО) в отходящие от них проводники (провода электропитания и информационные линии). Для исключения негативных последствий этой эмиссии токи радиопомех жестко ограничиваются всеми нормативными документами в этой области. Эти ограничения называются нормами, которые нельзя превышать во всем частотном диапазоне.

На рис. 1 приведены некоторые нормы на эмиссию токов кондуктивных радиопомех (ЭТРП), введенные отечественными стандартами КТ-160D (для БАО гражданской авиации) [1] и ОСТ В1 02696-90 (для БАО военной авиации) [2].

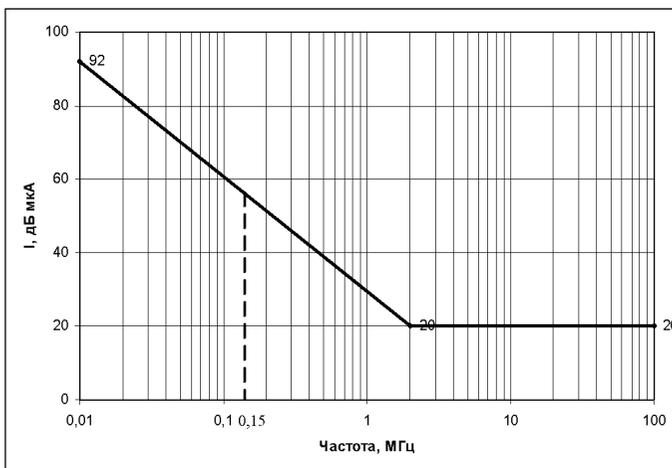


Рисунок 1 – Нормы эмиссии кондуктивных токов радиопомех от БАО в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц

На этом рисунке объединены нормы на ЭТРП по обоим стандартам, так как они отличаются только частотным диапазоном (полный график в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц распространяется на БАО военной авиации, а сокращенный – от 150 кГц до 100 МГц на БАО гражданской авиации).

Нормируются ЭТРП в дБ мкА. Это означает, что току в 1 мкА соответствует уровень в 0 дБ с дальнейшим пересчетом по формуле

$$I(\text{дБ}) = 20 \log I(\text{мкА}). \quad (1)$$

Таким образом, из рис. 1 видно, что в диапазоне частот от 2 МГц до 100 МГц нормы допускают уровень ЭТРП 20 дБ мкА, то есть 10 мкА. Это очень жесткие требования не только с точки зрения сложности обеспечения в БАО такой эмиссии, но и с точки зрения измерения таких токов. Последнее обстоятельство требует применения чрезвычайно чувствительной и широкополосной измерительной аппаратуры.

В испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» эта задача была решена после создания токосъемника ТС-А [3] под селективные измерительные приемники SMV-11 (диапазон частот от 10 кГц до 30 МГц) и SMV-8,5 (диапазон частот от 30 МГц до 100 МГц).

ТС-А представляет собой высокочастотное ферритовое кольцо с размерами 120x80x25 мм, на котором размещен объемный виток измерительного преобразователя (ИП-ТС), соединяемый при помощи штатного измерительного кабеля (ИК-ТС) с измерительным селективным устройством. При измерениях ЭТРП проводник, в котором протекает измеряемый ток, пропускают через ферритовое кольцо ТС-А. Вокруг проводника возникают кольцевые силовые линии магнитного поля, которые сосредоточены, в основном, внутри ферритового кольца. Эти силовые линии пронизывая измерительный виток

ИП-ТС перпендикулярно его плоскости наводят в нем э.д.с., которая является мерой измеряемого тока. Т.о. ТС-А – это одновитковый пояс Роговского.

Упрощенная схема замещения ТС-А приведена на рис. 2, где L_{Π} – индуктивность ИП; $R_{ИП}$ – входное сопротивление измерительного прибора; $U_{ИП}$ – напряжение на выходе ТС-А; $I_{ИП}$ – ток, протекающий в ТС-А; e_{Π} – э.д.с., наводимая в ИП.

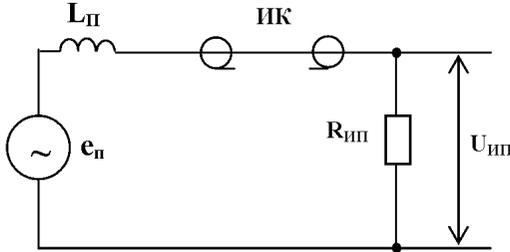


Рисунок 2 – Схема замещения ТС-А

$$e_{\Pi}^{\max} = -\mu_0 \mu_r s w \frac{dH(t)}{dt}, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость ферритового кольца; s – площадь витка, m^2 ; $w = 1$, количество витков; $H(t)$ – напряженность магнитного поля, пронизывающего виток.

Т.к. измеряются гармонические составляющие ЭТРП, то

$$H(t) = H_{\max} \cdot \sin \omega t. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) получим

$$e_{\Pi}^{\max} = -\mu_0 \mu_r s w \omega H_{\max}. \quad (4)$$

Связь между H_{\max} и измеряемым током $I_{РП}$ устанавливается законом полного тока, по которому

$$H_{\max} = \frac{I_{РП}^{\max}}{2\pi r_{cp}}, \quad (5)$$

где $2\pi r_{cp}$ – длина средней силовой линии магнитного поля в ферритовом кольце. Подставляя (5) в (4) получим окончательное выражение для

$$e_{\Pi}^{\max} = \frac{-\mu_0 \mu_r s w \omega I_{РП}^{\max}}{2\pi r_{cp}} = K_{ИП} \cdot \omega \cdot I_{РП}^{\max}, \quad (6)$$

где $K_{ИП} = \frac{-\mu_0 \mu_r s w}{2\pi r_{cp}}$ (предварительно считаем, что $\mu_r = \text{const}$).

Т.к. нас интересует напряжение на входе измерительного прибора $U_{ИП}$, то для нахождения его связи с e_{Π} , а следовательно и с $I_{РП}^{\max}$, необходимо проанализировать схему по рис. 2. Анализ этой схемы показывает, что

$$U_{III}^{\max} = I_{III}^{\max} \cdot R_{III} = \frac{e_{II}^{\max}}{\omega L_{II} + R_{III}} = K_{III} \frac{\omega}{1 + \frac{\omega L_{II}}{R_{III}}} \cdot I_{PII}^{\max}. \quad (7)$$

На практике связь между U_{III}^{\max} и I_{PII}^{\max} определяется экспериментально при калибровке ТС-А [4]. Для этого по проводнику пропускают одинаковый ток во всем частотном диапазоне, измеряя при этом напряжение с выхода ТС-А. А затем по формуле

$$K_K(\partial Б) = I_K(\partial Б) - U_{III}(\partial Б), \quad (8)$$

определяем $K_K(\partial Б)$ и строим его зависимость от частоты (рис. 3).

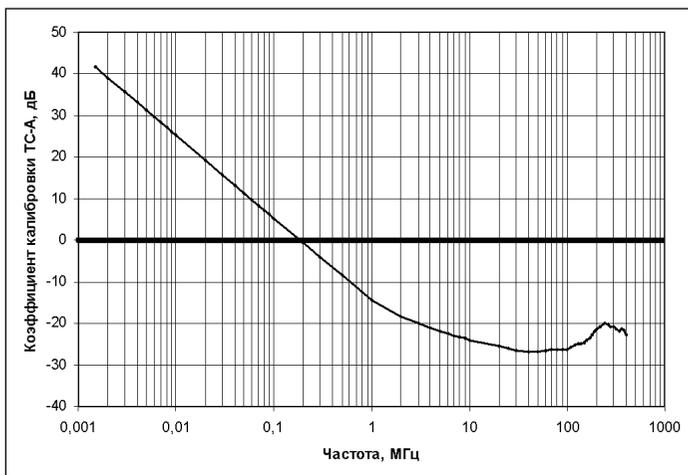


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента калибровки токосъемника ТС-А от частоты

В ИЛ НИПКИ «Молния» применяются два метода измерения ЭТРП. При первом методе ЭТРП измеряется с помощью измерительного приемника. Это достаточно длительная задача (она может длиться до 30-40 мин.), т.к. после измерения пиков ЭТРП в виде напряжений с выхода ТС-А, необходимо провести дополнительные математические расчеты. На практике же Заказчик работ требует быстрого экспресс-анализа своих ЭТРП. Эта задача была решена вторым методом, а именно, применением для измерения ЭТРП анализатора спектра FSL3, который позволил в течение 30 секунд визуально сравнивать ЭТРП с нормами на них и сразу определять, имеется ли превышение ЭТРП.

Для этого на экран FSL3 путем его программирования выводятся нормы на ЭТРП в виде красной линии.

Но одновременно с этим потребовалась и доработка имеющегося ТС-А.

Это объясняется тем, что в низкочастотной области ТС-А имеет малую чувствительность, что не позволяет из-за достаточно больших собственных шумов измерять слабые ЭТРП в этой области. Поэтому для того, чтобы в соответствии с требованиями нормативных документов собственные шумы были, как минимум, на 6 дБ ниже измеряемых напряжений, на тот же сердечник ТС-А было дополнительно намотано 10 витков провода, что позволило резко увеличить чувствительность нового измерителя (он назван ТС-А-Н) в низкочастотной области.

Кроме того, для упрощения и большей легитимности полученных результатов, измерение ЭТРП было заменено измерением U_{III}^{max} с последующим сравнением их с нормами на эти напряжения, используя формулу

$$U_{III}^{norm}(\text{дБ}) = I_{РП}^{norm}(\text{дБ}) - K_K(\text{дБ}), \quad (9)$$

где $I_{РП}^{norm}(\text{дБ})$ – нормы на ЭТРП из рис. 1; $K_K(\text{дБ})$ – коэффициент калибровки ТС-А по рис. 3.

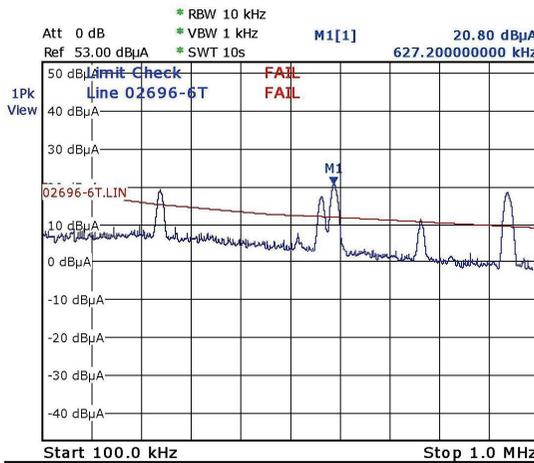


Рисунок 4 – Спектрограмма ЭТРП в проводах питания одного из испытанных изделий в диапазоне частот от 100 кГц до 1 МГц

Это переформатирование проведено с целью сравнения двух величин одинаковой размерности. Для этого из статической линии ЭТРП на ряде промежуточных частот были вычтены $K_K(\text{дБ})$, и FSL3 был перепрограммирован на статическую кривую зависимости U_{III}^{norm} от частоты. Кроме того, для более удобного анализа полученных результатов и меньшей зависимости U_{III}^{norm} от частоты, весь требуемый частотный диапазон был разбит на поддиапазоны (по 1 декаде на поддиапазон).

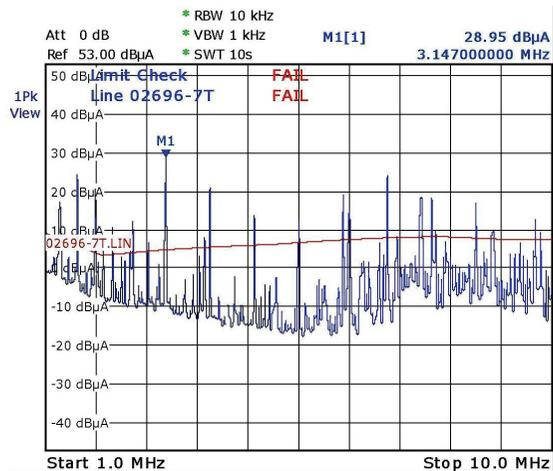


Рисунок 5 – Спектрограмма ЭТРО в проводах питания одного из испытанных изделий в диапазоне частот от 1 МГц до 10 МГц

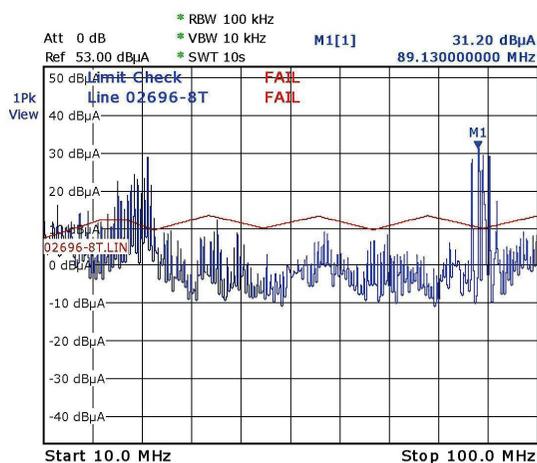
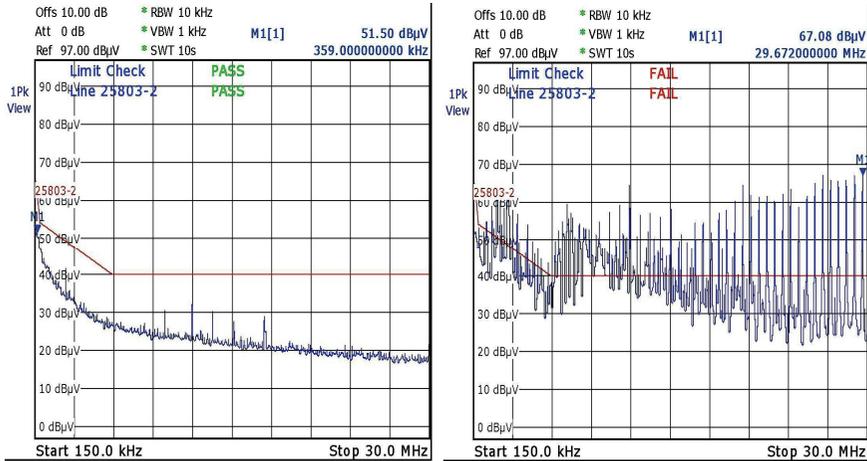


Рисунок 6 – Спектрограмма ЭТРО в проводах питания одного из испытанных изделий в диапазоне частот от 10 МГц до 100 МГц (превышение уровня ЭМП на частотах свыше 90 МГц объясняется наводкой от мощных FM радиостанций)

Получаемые при этом результаты показали несомненные преимущества этого метода измерения ЭТРО (рис. 4 -6).

Для более подробного выяснения всех частот, на которых ЭТРО превышает нормы, курсором FSL3 устанавливаются все максимумы ЭТРО, которые и заносятся в протокол испытаний для принятия последующих мер по

помехоподавлению ЭТРП.



Date: 26.JUN.2014 12:53:07

Date: 26.JUN.2014 11:52:22

а б
Рисунок 7 – Спектрограмма квазипиковых напряжений радиопомех
в проводах питания в диапазоне частот от 150 кГц до 30 МГц:
а – изделие выключено; б – изделие включено

Заключение. Приведенные выше данные о методике автоматизированного измерения ЭТРП при помощи ТС-А позволяют сделать заключение о возможности реализации всех действующих в Украине стандартов по измерению токов радиопомех.

Список литературы: 1. КТ-160Д Квалификационные требования. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 21.0 Излучение радиочастотной энергии. 2. ОСТ В1 02696-90 Оборудование бортовое. Общие требования на допустимые уровни создаваемых электромагнитных помех и методы их измерений. 3. Токосъемник типа ТС-А. Паспорт. ТС-000.000.000 ПС. 4. Немченко Ю.С. Измерение эмиссии токов радиопомех от бортового авиационного оборудования // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2014. – № 21. – С. 96-107.

Bibliography (transliterated): 1. КТ-160Д Kвалiфiкацiоннiе требованiя. Условiя jексплуатациi i окрyажайушhей среды длjа бортовогог авиационного оборудованiя. (Vнешнiе воздеjствуйушhие факторы – ВВФ). Требованiя, нормы i методы jспытанiй. Раздел 21.0 Излучение radioчастотной jенергии. Print. 2. OST V1 02696-90 Оборудование бортовое. Обshние требованiя на допустимые уровни создываемых jелектромангнитных помех i методы их измерений. Print. 3. Токосjемник типа ТС-А. Паспорт. ТС-000.000.000 ПС. Print. 4. Немченко Jy.S. Измерение jемиссии токгов радиопомех от бортовогог авиационного оборудованiя. Vestник NTU «HPI» «Техника i jелектрофизика высоких напрjазженiй». 2014. № 21. S.96-107. Print.

Поступила (received) 03.10.2014

Ю.С.НЕМЧЕНКО, гл. метролог, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
В.В.КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НИПКИ «Молния»
НТУ «ХПИ»;
И.П.ЛЕСНОЙ, зав. лаб., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

УСТАНОВКА У-КП-80 ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА НЕВОСПРИИМЧИВОСТЬ К КОНДУКТИВНЫМ ПОМЕХАМ В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ОТ 150 КГЦ ДО 80 МГЦ

Описана конструкция и результаты аттестации установки У-КП-80, предназначенной для испытания технических средств на невосприимчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями, в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц и выходным напряжением от 1 В до 10 В в соответствии со стандартом ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007. Требования стандарта ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007 являются обязательными к выполнению в Украине.

Ключевые слова: испытания, невосприимчивость, кондуктивные помехи, установка, аттестация

Введение. Кондуктивные помехи (КП) представляют собой общие несимметричные напряжения в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц, которые наводятся внешними электрическими полями в электронных технических средствах (ТС). Основными источниками этих полей являются мощные радио и телестанции, которые могут инжектировать помехи в линии электропитания, сигнальные линии, линии управления и в системы заземления ТС. Поэтому все такого рода ТС обязательно проходят испытания в лабораторных условиях по гармонизированному в Украине международному стандарту ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007 [1].

Основные результаты. В работе описан прямой метод испытания ТС высокочастотными кондуктивными помехами, вводимыми как в линию электропитания (с разрывом ее), так и в сигнальные линии и линии управления (без разрыва их). Для этого разработана и используется испытательная установка У-КП-80, которая изображена на рис. 1. Она содержит как стандартные приборы в качестве источника высокочастотных напряжений необходимой мощности (генератор высокочастотных сигналов RIGOL DG3112A и широкополосный усилитель мощности AMPLIFIER RESEARCH 75A400), так и самостоятельно изготовленные устройства ввода помехи (устройства связи-развязки УСП-С1 и УСП-С3 и электромагнитные клещи связи ЭКС). Все нестандартные элементы установки изготовлены в соответствии с рекомендациями Приложений А и D ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007.

Основные нормированные точностные характеристики (НТХ) установки

© Ю.С.Немченко, В.В.Князев, И.П.Лесной, 2014

У-КП-80 приведены в табл. 1.

Структурная схема установки У-КП-80 приведена на рис. 2.



Рисунок 1 – Общий вид установки У-КП-80:

- 1 – испытательный генератор высокочастотных сигналов RIGOL DG3121A;
- 2 – широкополосный усилитель мощности AMPLIFIER RESEARCH 75A400;
- 3 – устройство связи-развязки УСП-С1;
- 4 – устройство связи-развязки УСП-С3;
- 5 – электромагнитные клещи связи ЭКС

Таблица 1 – Степени жесткости установки У-КП-80 в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение	
	U_0 , дБ относительно 1 мкВ	U_0 , В
1	120	1
2	130	3
3	140	10
X	Специальное	

Знак «X» представляет собой открытый класс. Соответствующая степень жесткости испытаний может быть установлена в стандартах на ТС конкретного вида и технической документации на ТС

Генератор синусоидальных сигналов RIGOL DG3121A в режиме генератора качающейся частоты «SWEEP» предназначен для генерирования напряжений синусоидальных колебаний частотой от 150 кГц до 80 МГц с автоматической перестройкой частоты в течение 10 минут. Генератор позволяет осуществлять все виды модуляции несущей частоты, в том числе необходимую для испытаний амплитудную модуляцию частотой 1 кГц и глубиной 80 %.

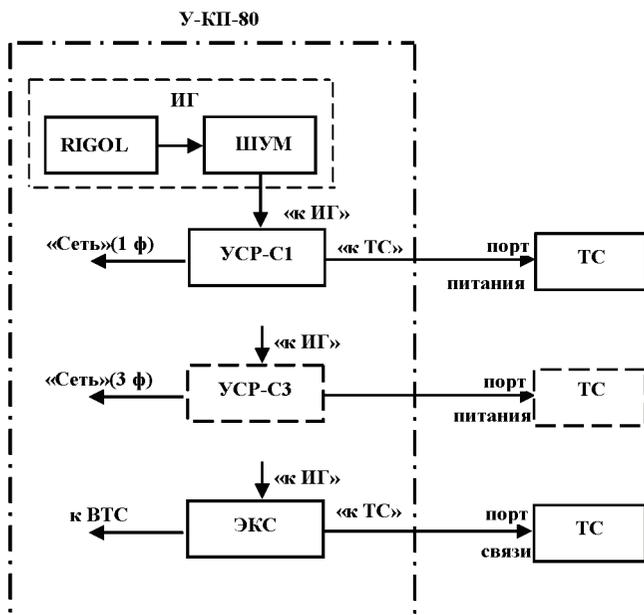


Рисунок 2 – Структурная схема установки У-КП-80:

ИГ – испытательный генератор;

RIGOL – генератор высокочастотных сигналов RIGOL DG3112A;

ШУМ – широкополосный усилитель мощности AMPLIFIER RESEARCH 75A400;

УСР-С1 – устройство связи-развязки для однофазных цепей питания ТС;

УСР-С3 – устройство связи-развязки для трехфазных цепей питания ТС;

ЭКС – электромагнитные клещи связи для испытания кабелей связи ТС;

ВТС – вспомогательное техническое средство

Широкополосный усилитель мощности AMPLIFIER RESEARCH 75A400 предназначен для усиления выходного напряжения генератора RIGOL DG3121A во всем испытательном диапазоне частот и имеет мощность 75 Вт, достаточную для обеспечения испытаний ТС как при помощи устройств связи/развязки, так и электромагнитных клещей связи по табл. 1.

Электромагнитные клещи связи ЭКС предназначены для ввода кондуктивных помех от испытательного генератора ИГ частотой от 150 кГц до 80 МГц в отдельные кабели или жгуты кабелей, соединяющих испытываемые ТС и вспомогательные ТС.

Методика проведения испытаний ТС с помощью установки У-КП-80 заключается в нагружении линий связи или линий питания ТС кондуктивными помехами или непосредственно путем подачи испытательного напряжения между началом концом экрана данного кабеля, или через устройство связи-развязки УСР-С1 (однофазное), или устройство связи-развязки УСР-С3 (трехфазное).

Таблица 2 – Результаты определения НТХ испытательного напряжения по трем степеням жесткости в режиме работы без УСР

Частота, МГц	0,15	0,3	0,5	0,75	1,0	1,0	2,0	3,5	5,0	7,5	10	15
3 ст. ж.	10	10,1	10,4	10,7	10,9	10	10,3	10,4	10,3	10	9,76	9,37
2 ст. ж.	3,13	3,16	3,25	3,28	3,30	3,16	3,25	3,28	3,23	3,14	3,08	2,96
1 ст. ж.	1,02	1,03	1,07	1,09	1,10	1,03	1,05	1,06	1,06	1,02	1,00	0,96
Частота, МГц	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
3 ст. ж.	9,66	9,72	9,68	9,6	9,54	9,46	9,53	9,45	10,1	9,85	10,2	10,6
2 ст. ж.	3,05	3,07	3,06	3,03	3,01	2,98	3,01	2,99	3,16	3,11	3,22	3,31
1 ст. ж.	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,97	0,96	1,04	1,01	1,04	1,08

Таблица 3 – Результаты определения НТХ испытательного напряжения по трем степеням жесткости в режиме работы с УСР

Частота, МГц	0,15	0,3	0,5	0,75	1,0	2,0	3,5	5,0	7,5	10	15	20
3 ст. ж.	10	10,1	10,4	10,6	10,8	10,0	10,1	9,98	9,67	9,38	10	9,76
2 ст. ж.	2,80	2,82	2,91	2,96	3,10	2,80	2,82	2,79	2,72	2,94	2,80	2,73
1 ст. ж.	1,0	1,01	1,04	1,06	1,09	1,05	1,01	1,00	0,97	0,98	1,00	0,98
Частота, МГц	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
3 ст. ж.	10,2	10,4	10,4	10,4	10,4	10,2	10,2	10,2	10,1	10,1	10,1	10,3
2 ст. ж.	2,85	2,91	2,91	2,91	2,91	2,85	2,85	2,85	2,82	2,82	2,82	2,88
1 ст. ж.	1,02	0,963	1,04	1,04	1,04	0,948	1,02	1,02	1,01	1,01	0,01	0,969

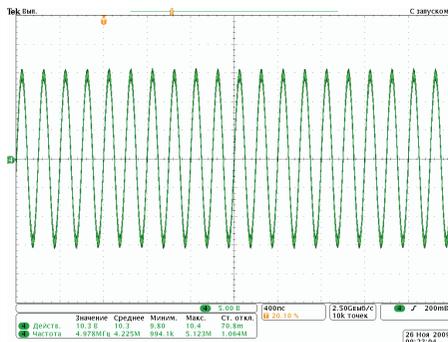


Рисунок 3 – Типовая осциллограмма не модулированного выходного напряжения $U_{эфф} = 10$ В на частоте 10 МГц (без УСР)

Результаты определения НТХ испытательного напряжения по трем степеням жесткости в режиме работы без УСР приведены в табл. 2.

Результаты определения НТХ испытательного напряжения по трем степеням жесткости в режиме работы с УСР приведены в табл. 3.

Установка У-КП-80 успешно прошла государственную аттестацию, ре-

зультаты которой приведены ниже. На рис. 3-4 приведены типовые осциллограммы выходных напряжений установки У-КП-80 в режиме работы без УСР.

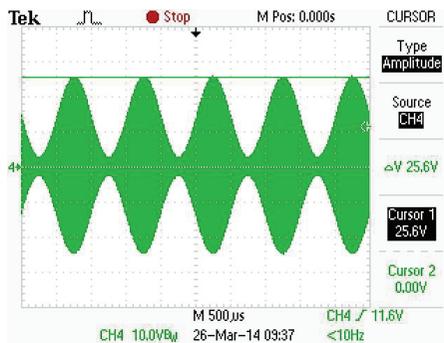


Рисунок 4 – Типовая осциллограмма выходного напряжения $U_{эфф} = 10$ В амплитудно-модулированного частотой 1 кГц (без УСР)

Выводы: Установка У-КП-80 прошла государственную аттестацию и успешно применяется в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» для проведения испытаний технических средств на устойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц.

Список литературы: 1. ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007 Електромагнітна сумісність. Частина 4-6. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до кондуктивних завад, індукованих радіочастотними полями (ІЕС 61000-4-6:2006, ІДТ). 2. Установка У-КП-80 для испытаний технических средств на устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями. Руководство по эксплуатации У-КП-80.000.000.000 РЭ.

Bibliography (transliterated): 1. DSTU IEC 61000-4-6:2007 Elektromagnitna sumisnist'. Chastina 4-6. Metodiki viprobuvannja ta vimirjuvannja. Viprobuvannja na nesprijnjatlivist' do konduktivnih zavad, indukovanih radiochastotnimi poljami (IES 61000-4-6:2006, IDT). Print. 2. Ustanovka U-KP-80 dlja ispytanij tehniceskikh sredstv na ustojchivosť k konduktivnym pomехам, navedennym radiochastotnymi jelektromagnitnymi poljami. Rukovodstvo po jekspluataciji U-KP-80.000.000.000 RJe. Print.

Поступила (received) 21.10.2014

М.М. РЕЗИНКИНА, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., ИТПМ НАН Украины, Харьков;
О.Л. РЕЗИНКИН, д-р техн. наук, зав. каф., НТУ «ХПИ»;
Е.Е. СВЕТЛИЧНАЯ, аспирант, НТУ «ХПИ»

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРИЕНТИРОВКИ МОЛНИИ НА НАЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВСТРЕЧНОЙ ИСКРЫ

Предложена статистическая модель электрофизических процессов при «выборе» лидерным каналом молнии объектов для удара на земле с учетом возможности распространения от них встречной искры. Соответствие данной модели рассматриваемым процессам подтверждено путем сравнения результатов расчета вероятности места поражения высоковольтным разрядом земли и находящихся на ней объектов с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: молния; лидерный канал, пробой, математическое моделирование.

Введение. В связи со сложностью экспериментального исследования процессов, связанных с «выбором» лидерным каналом молнии места удара на земле, в настоящее время разработано большое число математических моделей, описывающих данные процессы [1-3]. Самые известные из них, достаточно простые и наглядные - так называемый электрогеометрический метод и родственный ему Rolling Sphere Model, положены в основу нормирования зон защиты молниеотводов, например в США [4]. Данные методы косвенно подразумевают наличие восходящего лидера от наземных объектов. Однако целенаправленных исследований, связанных с физическим и математическим моделированием восходящих разрядов от объектов на земле, недостаточно. Как показано в ряде публикаций [5,6], каналы разрядов, развивающихся от наземных объектов в условиях грозовой обстановки, играют существенную роль при ориентировке лидерного канала молнии на наземные объекты. Так, во Франции и в Испании действуют нормативные документы, предусматривающие испытания так называемых активных молниеотводов, принцип действия которых предположительно основан на генерировании встречных лидеров. Однако оговоренные в этих документах испытания не позволяют в полной мере учесть электрофизические процессы, сопровождающие возникновение и продвижение восходящих лидеров, и оценить преимущества и недостатки различных молниеотводов в условиях грозовой обстановки.

Данная статья посвящена описанию статистической модели электрофизических процессов при продвижении лидерного канала молнии к наземным объектам и «выбора» ею места поражения с учетом возможности развития

встречных искровых разрядов от наземных объектов. Приводится также сравнение результатов статистического моделирования и экспериментальных данных, положенных в основу действующих в Украине и бывшем СССР нормативных документов по молниезащите.

Основная часть

Статистическое моделирование «выбора» молнией места удара с учетом возможности развития восходящей искры от заземленных объектов. При статистическом моделировании места удара молнии необходимо провести ряд математических экспериментов, проварьировав все возможные зоны, откуда могут продвигаться лидерные каналы молнии. При этом нужно учесть разброс величин тока молнии, а также уровней ее потенциала и высоты ориентировки на наземные объекты.

Величина максимума тока возвратного удара главной стадии молнии I_m может быть измерена, и поэтому существуют систематизированные экспериментальные данные о распределении вероятностей появления молнии с определенной величиной разрядного тока (см. например [7]).

В [8, с. 51] указывается, что высота ориентировки молнии на наземные объекты (l_S) определяется исходя из условия достижения E_{cr} «критического электрического поля», необходимого для пробоя промежутка. Там же отмечается, что E_{cr} должно быть больше или равно $0.5 \cdot 10^6$ В/м для отрицательных лидеров и $0.3 \cdot 10^6$ В/м для положительных.

В [9, с. 176] величина E_{cr} определяется как находящаяся между напряженностью ЭП, необходимой для развития отрицательных стримеров - E_{st-} и положительных стримеров - E_{st+} . Однако в ряде публикаций (см. например [5,6,10,11]) напряженность ЭП, необходимая для развития отрицательного стримера, полагается равной E_{st-} .

В большинстве литературных источников, а также в нормативных документах (см. например [7-9]) зависимость между I_m и l_S представляют в виде:

$$l_S = a \cdot I_m^b, \quad (1)$$

где I_m [кА], l_S [м]; a , b – коэффициенты.

Величины коэффициентов в (1) в различных источниках полагаются равными: a от 1.9 до 10, b – от 0.65 до 0.9 (см. например [9, с. 181; 8, с. 53]).

При моделировании процесса «выбора» лидерным каналом молнии места удара важным параметром является его потенциал U_m . Величина U_m пропорциональна I_m , причем согласно [5, с. 172, 185] между I_m и U_m существует связь: $U_m \approx k_U \cdot I_m \cdot Z$ ($k_U \sim 1.7$, $Z \sim 500$ Ом). Тогда, полагая, что $l_S = U_m / E_{st-}$, получим:

$$l_S \sim 0.8 \cdot I_m,$$

где I_m [кА]; l_S [м].

Сходный подход к определению величины расстояний, с которых начинается ориентировка отрицательных лидеров молнии, используется в [12]:

$$I_S = 1.9 \cdot I_m^{0.9},$$

где I_m [кА]; l_S [м], хотя при этом напряженность ЭП в промежутке «лидер – земля» полагалась равной E_{st+} .

Подобно тому, как это было сделано в [3], для учета всех возможных вариантов удара молнии в исследуемую территорию («область на земле» – см. 1, рис. 1), разобьем ее площадь (S_G) квадратной сеткой с шагом Δ : в результате получим K_G ячеек площадью $S_{Gk} = S_G / K_G = \Delta^2$.

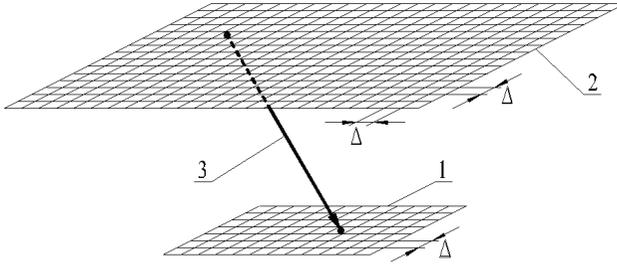


Рисунок 1 – Расчетная система: 1 – «область на земле», 2 – «грозовое облако», 3 – лидерный канал молнии

Будем полагать, что вероятность поражения ячейки обратно пропорциональна времени продвижения лидерного канала молнии до соответствующего ей узла. Поскольку молнии могут ударять в «область на земле» с большей площади, находящейся над ней («грозовое облако» – см. 2, рис. 1), для моделирования всех возможных мест старта нисходящих лидеров молнии увеличим S_G на M ячеек, получив в результате K_S ячеек и соответствующих им узлов ($K_S > K_G$). Будем полагать, что вероятность попадания молнии одинакова в пределах k -ой ячейки расчетной сетки и пропорциональна ее площади S_{Gk} .

В [11, с. 66] на основе анализа экспериментальных данных показано, что среднее квадратичное отклонение разброса пробивных напряжений для разрядных промежутков длиной 2 – 30 м мало зависит от их длины и близко к 6 – 7%. Там же отмечается, что факторами, влияющим на появление разброса, могут относиться вариации момента возникновения лидера, скорости его развития, длины стримеров, напряженности в лидерной и стримерной зонах. Исходя из этих данных, примем, что разброс времен развития разряда составляет $\varepsilon_S = 0.07$. Будем полагать, что разряд молнии заданного потенциала U_i из j -ого узла «грозового облака» может произойти только в те K_j^i узлов «области на земле», длительность продвижения к которым лидерного канала $t_{k,j}^i$ не превышает более чем в $(1 + \varepsilon_S)$ раз минимальное время продвижения конкурирующих разрядных каналов во все ячейки «области на земле» в данном численном эксперименте: $t_{k,j}^i \leq (1 + \varepsilon_S) \cdot t_{j_{\min}}^i$ (где $t_{j_{\min}}^i = \min\{t_{k,j}^i\}$). Поражение же всех остальных ячеек в данном численном эксперименте будем

считать невозможным, и вероятность этого события для данных ячеек полагаем равной нулю. Здесь узлы «области на земле», в которые может произойти прорыв молнии, имеют индекс « k »; всего таких узлов для данного численного эксперимента, моделирующего удар молнии с потенциалом U_i из узла j , может быть K_j^i .

Учитывая, что в данном численном эксперименте может быть только один удар молнии, будем понимать под $P_{k,j}^i$ - плотностью вероятности прорыва молнии в k -ый узел «области на земле», долю ударов в него молнии из всех возможных ячеек «грозового облака» в данном численном эксперименте. Будем исходить из предположения, что величина $P_{k,j}^i$ обратно пропорциональна времени распространения до нее лидера молнии: $P_{k,j}^i \sim 1/t_{k,j}^i$ и зависит от количества и площади ячеек, вероятность поражения которых в данном численном эксперименте отлична от нуля. Например, если из расчета получилось, что времена движения лидерного канала молнии в каждый из K_j^i узлов одинаковы, то одинаковы и плотности вероятности поражения каждого из этих узлов.

Пронормируем коэффициент, пропорциональный вероятности прорыва молнии в узел ($KP_{k,j}^i$), так, чтобы он равнялся 1 для узлов, время распространения до которых в данном численном эксперименте минимально ($t_{j\min}^i$), а для узлов, время распространения до которых более чем в $(1+\varepsilon_S)$ раз превышает $t_{j\min}^i$ – он равнялся нулю:

$$KP_{k,j}^i = 1 - \frac{1/t_{j\min}^i - 1/t_{k,j}^i}{1/t_{j\min}^i - 1/[t_{j\min}^i \cdot (1 + \varepsilon_S)]} = 1 - \frac{1 + \varepsilon_S}{\varepsilon_S} \cdot \frac{1/t_{j\min}^i - 1/t_{k,j}^i}{1/t_{j\min}^i}. \quad (2)$$

Для того чтобы учесть зависимость вероятности поражения молнией узла «области на земле» от общего количества и площади ячеек, которые могут быть поражены в данном численном эксперименте, запишем $P_{k,j}^i$ в виде:

$$P_{k,j}^i = KP_{k,j}^i \cdot K_j. \quad (3)$$

Коэффициент K_j получим из условия равенства единице вероятности поражения одного из K_G узлов «области на земле» в данном численном эксперименте:

$$\sum_{k=1}^{K_G} P_{k,j}^i = K_j \cdot \sum_{k=1}^{K_G} KP_{k,j}^i = 1.$$

Тогда

$$K_j = 1 / \sum_{k=1}^{K_G} KP_{k,j}^i. \quad (4)$$

Пусть, например, расчеты показали, что при распространении молнии из

j -ого узла «грозового облака» длительность продвижения в два узла «области на земле» существенно (на порядок и более) меньше, чем для всех остальных узлов (например, координаты этих узлов соответствуют координатам молниеотводов), причем, $t_{k1,j}^i = t_{j\min}^i$, $t_{k2,j}^i = (1/0.95) \cdot t_{k1,j}^i = 1.0526 \cdot t_{k1,j}^i$. Тогда из (2) получим: $KP_{k1,j}^i = 1$, $KP_{k2,j}^i = 0.236$. Подставив эти значения в (4):

$$K_j = 1 / \sum_{k=1}^2 KP_{kj}^i \approx 0.81. \text{ Окончательно рассчитаем вероятности поражения}$$

молнией каждого молниеотвода в данном численном эксперименте, подставив полученные значения в (3): $P_{k1,j}^i = KP_{k1,j}^i \cdot K_j \approx 0.81$, $P_{k2,j}^i \approx 0.19$. Таким образом, суммарная вероятность данного события равна 1: $P_{k1,j}^i + P_{k2,j}^i = 0.81 + 0.19$.

Зная P_i — вероятность появления молнии с током, меньшим I_i (см. например [7]), просуммировав все $P_{k,j}^i$ от ударов молний с амплитудами I_i , лидеры которых берут начало из j -ых ячеек «грозового облака», получим выражение для прогнозируемого числа ударов молнии в k -ый узел «области на земле» в виде:

$$N_k = 10^{-6} \cdot N_m \cdot \sum_{i=1}^M \{ (P_{i+1} - P_i) \cdot \sum_{j=1}^J [\Delta^2 \cdot P_{k,j}^i] \},$$

где M — число интервалов, на которое разбит диапазон изменения тока молнии, причем $\sum_{i=1}^M (P_{i+1} - P_i) = 1$; N_m — среднегодовое число ударов молнии в 1 km^2 земной поверхности в данной географической зоне (см. например [5,8]); Δ^2 — площадь ячейки в m^2 .

Время продвижения нисходящего лидерного канала от j -ого узла «грозового облака» до i -ого узла «области на земле» рассчитывается следующим образом:

$$t_{k,j}^i = (L_{k,j} - l_S^i) / v_{0L\downarrow}^i + l_S^i / (v_{L\downarrow}^i + v_{L\uparrow}^i), \quad (5)$$

где $L_{k,j}$ — расстояние между i -м узлом «области на земле» и j -м узлом «грозового облака» в начале процесса движения из него лидерного канала молнии; l_S^i — высота ориентировки молнии с потенциалом U_i , лидерный канал которой движется из j -ого узла «грозового облака»; $v_{0L\downarrow}^i$, $v_{L\downarrow}^i$ — соответственно скорости нисходящих лидерных каналов молнии с потенциалом U_i до и после начала сквозной фазы; $v_{S\uparrow}^i$ — скорость восходящей искры от наземных объектов для молнии с потенциалом U_i .

В том случае, когда условия возникновения и развития восходящего лидера не выполняются, $v_{S\uparrow}^i$ в (5) полагается равной нулю.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных по месту разряда в длинных воздушных промежутках. Для сравнения результатов расчета вероятностных мест поражения высоковольтным разрядом при наличии и отсутствии встречной искры от заземленных объектов рассмотрим системы, описанные в [13]. Несмотря на то, что данные исследования были выполнены более 70 лет назад, они по-прежнему представляют ценность, хотя бы потому, что именно они положены в основу до сих пор действующего в России и странах СНГ нормативного документа [14], регламентирующего зоны защиты молниеотводов. Почти все эксперименты, результаты которых приведены в [13], были проведены при приложении к имитирующему лидерный канал молнии высоковольтному электроду напряжения положительной полярности. Для обоснования такого подхода в [13] приводятся сравнительные данные о местах пробоя при подаче на высоковольтный электрод импульсного напряжения положительной и отрицательной полярности при одних и тех же остальных параметрах системы. В этих экспериментах (схема представлена на выноске к рис. 2, *a*) высоковольтный стержневой электрод (1) располагался над заземленной плоскостью (2) на расстоянии $L = 1.6$ м от нее, а также на расстоянии L от заземленных объектов, имитирующих молниеотвод (3) и защищаемый объект (4). Как следует из экспериментов, при приложении к высоковольтному электроду 1 напряжения положительной полярности (см. [13, фиг. 1, *a*]), примерно $N_2 = 80$ % разрядов поражает плоскость, $N_3 = 8$ % – электрод 3 и $N_4 = 12$ % – электрод 4.

Математическое моделирование с помощью описанной выше методики дало следующие данные: плоскость – $N_2 = 76$ %, электрод 3 – $N_3 = 10$ %, электрод 4 – $N_4 = 14$ % (см. рис. 2, *a*).

При моделировании полагалось, что встречная искра от заземленных объектов развиваться не будет, поскольку для развития лидера отрицательной полярности требуется напряженность ЭП, существенно (до 2-х раз) превышающая напряженность в стримерном канале нисходящего лидера положительной полярности.

При приложении к высоковольтному электроду напряжения отрицательной полярности, когда от объекта 3 может развиваться встречная искра, примерно $N_3 = 85$ % разрядов поражает электрод 3 и $N_2 = 15$ % – плоскость (см. [19, фиг. 1, *б*]). Математическое моделирование с помощью описанной выше методики дало следующие результаты: электрод 3 – $N_3 = 84$ %, плоскость под высоковольтным электродом (2) – $N_2 = 16$ % (см. рис. 2, *b*). При моделировании полагалось, что от заземленного объекта 3 будет развиваться встречная искра, поскольку для развития лидера положительной полярности требуется напряженность ЭП, в 2 раза меньшая, чем напряженность в стримерном канале нисходящего лидера отрицательной полярности. Причем, уровень пробивной напряженности $E_c = 3 \cdot 10^6$ В/м достигается на вершине объекта 3 и не достигается на вершине объекта 4, поскольку он находится в зоне ослабленного ЭП из-за наличия объекта 3. Как следует из [13], в экспе-

рименте встречная искра тоже развивается только от объекта 3.

При моделировании полагалось, что к электроду 1 прикладывалось положительное напряжение $U = +0.7 \text{ MV}$ или отрицательное напряжение $U = -1.4 \text{ MV}$. Скорость стримеров задавалась равной 10^6 m/s , погонная емкость лидера в сквозной фазе – 10 pF/m . Скорость положительных нисходящих лидеров до начала сквозной фазы полагалась равной $v_{0L\downarrow}^i = 10^6 \text{ m/s}$, скорость отрицательных нисходящих лидеров $v_{0L\downarrow}^i = 1.5 \cdot 10^5 \text{ m/s}$, скорость положительных восходящих лидеров $v_{s\uparrow}^i = 0.3 \cdot 10^5 \text{ m/s}$. При этом ток в сквозной фазе получился при расчетах равным 7 A при приложении напряжения положительной полярности и 14 A при приложении напряжения отрицательной полярности.

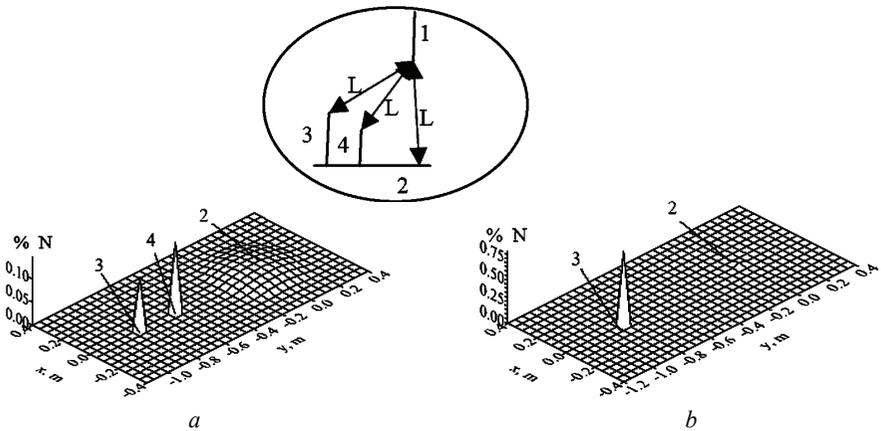


Рисунок 2 – Рассчитанные распределения прогнозируемого процентного распределения числа попаданий нисходящих разрядов в расположенные на земле (2) объекты (3,4) при приложении к высоковольтному электроду (1) напряжения: *a* – положительной полярности; *b* – отрицательной полярности. На выноске показана рассматриваемая система.

Таким образом, использование описанной модели позволило рассчитать вероятности места пробоя при приложении к промежутку «высоковольтный стержень – два стержня на заземленной плоскости» импульсов положительной и отрицательной полярности. Данные моделирования и эксперимента [13] совпадают в пределах $5 - 25 \%$.

Закключение. Предложена статистическая модель для определения вероятности удара молнии в объекты на земле с учетом их высоты и габаритов, а также возможности развития от них встречной искры. Данная модель основана на анализе имеющихся литературных данных о параметрах молний, а

также электрофизических процессах при пробое длинных воздушных промежутков. Предложенная модель была использована для расчета вероятности места удара длинной искры при приложении к высоковольтному электроду напряжения положительной и отрицательной полярности. Сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными показало их совпадение в пределах 4 – 25 %.

Список литературы: 1. Петров Н., Петрова Г. // ЖТФ. – 1999. – Т. 69. Вып. 4. – С. 134–137. 2. Дульзон А.А., Лопатин В.В., Носков М.Д., Плешков О.И. // ЖТФ. – 1999. – Т. 69. Вып. 4. – С. 48-53. 3. Резинкина М.М. // ЖТФ. – 2008. – Т. 78. № 5. – С. 1-7. 4. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. – 108 P. 5. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001. – 319 с. 6. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. – М.: Изд-во МФТИ, 1997. – 320 с. 7. IEC 62305-2. International standard «Protection against lightning – Part 2: Risk management». – Geneva: IEC, 2010. – 84 p. 8. Uman M.A. The Art and Science of Lightning Protection. – New York: Cambridge University Press, 2008. – 240 p. 9. Cooray V. Lightning Protection. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. – 1036 p. 10. Базелян Э.М., Разжанский И.М. Искровой разряд в воздухе. – Новосибирск: Наука, 1988. – 165 с. 11. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 222 с. 12. Cooray V., Rakov V., Theethayi N. J. // Electrostatics. – 2007. – № 65. – P. 296-306. 13. Акопян А.А. // Труды ВЭИ. – 1940. – Вып. 36. – С. 94-159. 14. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 24 с.

Bibliography (transliterated): 1. Petrov H., Petrova G. ZhTF. 1999 T. 69. Vyp. 4, s. 134-137. Print. 2. Dulzon A.A., Lopatin V.V., Noskov M.D., Pleshkou O.I ZhTF.. 1999 T. 69 Vyp 4. s. 48-53. Print. 3. Rezinkina M.M. ZhTF. 2008. T. 78. № 5. S. 1-7. Print. 4. NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 P. Print. 5. Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Fizika molnii i molniezashhity. Moscow: Fizmatlit, 2001. 319 s. Print. 6. Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Iskrovoj razrjad. Moscow: Iz-dvo MFTI, 1997. 320 s. Print. 7. IEC 62305-2. International standard «Protection against lightning – Part 2: Risk management». Geneva: IEC, 2010. 84 p. Print. 8. Uman M.A. The Art and Science of Lightning Protection. New York: Cambridge University Press, 2008. 240 p. Print. 9. Cooray V. Lightning Protection. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010. 1036 p. Print. 10. Bazeljan Je.M., Razhanskij I.M. Iskrovoj razrjad v vozduhe. Novosibirsk: Nauka, 1988. 165 s. Print. 11. Bazeljan Je.M., Gorin B.N., Levitov V.I. Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashhity. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 222 s. Print. 12. Cooray V., Rakov V., Theethayi N. J. Electrostatics. 2007. N 65. P. 296–306. Print. 13. Akopjan A.A. Trudy VJeI. 1940. Vyp. 36. s. 94-159. Print. 14. RD 34.21.122-87. Instrukcija po ustrojstvu molniezashhity zdaniij i sooruzhenij. Moscow: Jenergoatomizdat, 1989. 24 s. Print.

Поступила (received) 22.09.2014

А. Ф. РОЗВАДОВСКИЙ, канд. техн. наук, НТТУ «КПИ»;
М. В. РОДИОНОВА, канд. техн. наук, доцент, НТТУ «КПИ»;
В. В. ПИЛИНСКИЙ, канд. техн. наук, профессор, НТТУ «КПИ»

СРАВНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ WI-FI И PLC СЕТЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Рассмотрены возможности использования Wi-Fi и PLC сетей для управления производственным оборудованием с учетом требований обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Выполнен расчет распределения электромагнитного поля, создаваемого этими сетями. Сравнение технологий Wi-Fi и проводно-беспроводных PLC сетей показало, что их можно использовать, исходя из конкретных условий. Требуемое распределение электромагнитного поля для PLC сетей достигается при использовании дополнительных экранирующих средств.

Ключевые слова: управление производственным оборудованием, электромагнитная совместимость, распределение электромагнитного поля, Wi-Fi, PLC - сети.

Введение. Одна из задач проектирования, возникающих при развертывании производства, – эффективное использование современных систем контроля и управления, а также «интеллектуальных» приборов. Для ее решения целесообразно объединять операторские телетайпы, управляющие серверы, программируемые логические контроллеры, системы комплексной автоматизации промышленного производства и распределенные системы управления с применением корректно разработанных и реализованных каналов связи. Иначе говоря – путем комплексного использования имеющихся технологий [1]. При объединении информационных устройств в единую сеть возрастает актуальность обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС), в частности, в связи с непрерывным совершенствованием и усложнением элементной базы, а также необходимостью сопряжения оборудования различных производителей.

Альтернатива существующим производственным сетям, использующим выделенные каналы управления – сети общего пользования, получившие широкое распространение при построении офисных, домовых, общественных локальных сетей. Эти сети имеют относительно невысокую стоимость и, в то же время, обеспечивают высокую скорость передачи, гибкость настроек, стабильность, расширяемость, доступность.

При построении производственной сети возникает вопрос выбора ее типа: проводная, беспроводная, комбинированная (проводно-беспроводная). В каждом конкретном случае это определяют на основе исходных данных: обеспечение требуемой скорости передачи, необходимая площадь покрытия, минимальное отношение сигнал/шум и т.д. Характеристики такой сети зави-

сят не только от выбора технологического и коммутационного оборудования, но и от правильного планирования топологии сети, сопряжения отдельных ее сегментов и устройств, реализации информационных и управляющих каналов, и т.д.

Цель статьи – анализ возможности использования сетей передачи данных по линиям электропитания (PowerLineCommunication, PLC) для построения сетей управления производственным оборудованием; – оценка и сравнение факторов, влияющих на ЭМС и функциональных параметров с другими технологическими решениями, в частности Wi-Fi сетями.

1. Выбор технологии для построения производственной сети

Среди проводных технологий наибольшее распространение получили сети, использующие витую пару. В основном к ним относятся различные Ethernet-сети со скоростями передачи от 10 Мбит/с до 1 Гбит/с. Кроме этого, в качестве «проводного» интерфейса могут использовать также: оптическое волокно, телефонные провода (HomePhonelineNetworkingAlliance – HomePNA), провода линий электропитания.

В настоящее время вследствие хорошо развитой инфраструктуры и непрерывно возрастающей скорости передачи данных проводные сети, использующие электрические провода, получают все большее распространение. Их также можно использовать для организации управления производственным оборудованием. В этом случае могут быть решены две задачи: обеспечение электропитание отдельных устройств и реализация их объединения в единую сеть.

При построении таких сетей наиболее часто используют различные версии технологии HomePlug [2]. Одной из наиболее перспективных можно считать версию HomePlugAV [3], обеспечивающую передачу данных без применения регенераторов на расстояние до 200 м с максимальной скоростью передачи – до 200 Мбит/с. Потребляемая мощность устройств HomePlugAV – (3...5) Вт, а выходная мощность – около 160 мВт.

Среди многообразия существующих беспроводных интерфейсов: Bluetooth, Wi-Fi, WiMAX, EDGE, GPRS и т.д. наиболее перспективной для построения производственной сети принято считать технологию Wi-Fi. Это обусловлено радиусом действия – порядка 100 м, максимальной мощностью излучения – до 1 Вт, максимальной скоростью передачи данных – до 600 Мбит/с [4,5].

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики технологии Wi-Fi и технологии HomePlugAV.

Из табл. 1 видно, что при достаточно близких параметрах характеристиках технология HomeplugAV обеспечивает теоретически меньшую скорость передачи данных. Однако для технологического оборудования чаще в качестве основных параметров принимают надежность и стабильность передачи данных, нежели максимальную скорость передачи.

Необходимо отметить, что в настоящий момент все большее распространение получают комбинированные (проводно-беспроводные) системы

передачи по электрическим проводам, сочетающие достоинства проводной и беспроводной передач: отказ от специализированных каналов связи, уменьшение размеров «мертвых зон», уменьшение интерференции, использование регенераторов и т.д.

Рассмотрим более подробно возможности построения систем контроля и управления производственным оборудованием с применением электрических проводов.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики технологий Wi-Fi и HomeplugAV

№ п/п	Характеристика	Wi-Fi	Homeplug AV
1	Используемая частота, МГц	2400...2483,5; 5170...5320; 5725...5825	2...28
2	Выходная мощность, мВт	$\leq 1000(100)^*$	160
3	Вид модуляции	OFDM, BPSK, QPSK, QAM-16/64	OFDM, BPSK, QAM-16/64/256/1024
4	Способ кодирования	Код Баркера, комплементарное кодирование (Complementary Code Keying, CCK)	Код Рида-Соломона; сверхточное кодирование (Turbo Convolutional Code, TCC)
5	Дальность передачи, м	100...300	150...200
6	Отношение сигнал/шум, дБ	≤ 5 дБ для передачи данных ≤ 25 дБ для передачи голоса	н/д
7	Максимальная скорость, Мбит/с	600	200

*Максимальная мощность передатчика в диапазоне 2,4 ГГц, допускаемая FCC (США) для Wi-Fi равна 1 Вт; ETSI (Европейский Союз) допускает не более 100 мВт.

2. Расчет распределения электромагнитного поля внутри здания

На рис. 1 приведена схема расположения проводов для примера расчета распределения электромагнитного поля, создаваемого электрическими проводами, расположенными в двух смежных, не связанных друг с другом помещениях с двумя и тремя комнатами соответственно.

Электромагнитное поле, создаваемое электрическими проводами внутри помещений, представленных в виде ломаной $ab...l$, зависит от распределения тока вдоль них.

На рис. 2, а и рис 2, б приведены нормированные к максимальному значению распределения тока для различного числа источников сигнала: U_1 на рис. 2, а и $U_1...U_4$ на рис. 2, б. Расчеты выполнены методом моментов с использованием программного пакета MMANA-GALv.1.2.0.20. Нормирование проведено для удобства и наглядности представления результатов.

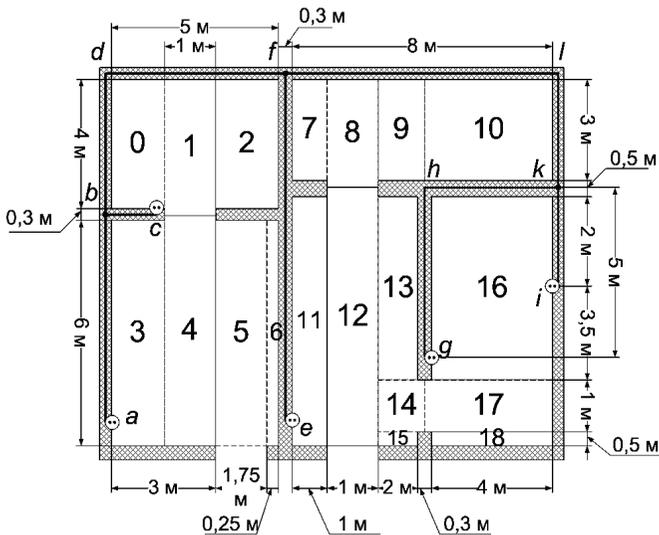


Рисунок 1 – Расположение электрических проводов в двух несвязанных помещениях

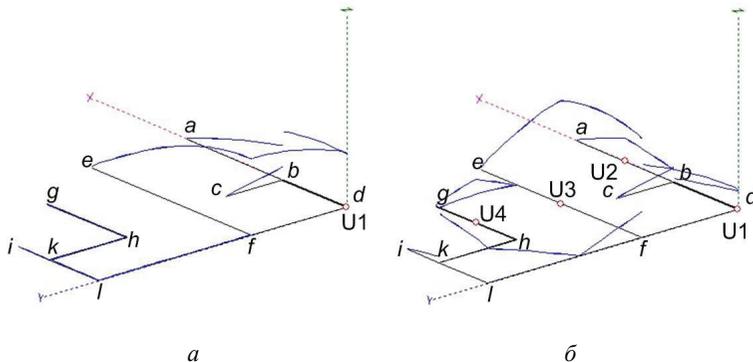


Рисунок 2 – Нормированные распределения тока вдоль проводов электропитания: *а* – для одного источника сигнала U_1 ; *б* – для четырех источников сигналов $U_1 - U_4$

Напряжение источников электропитания предположим одинаковым и равным $U = 10$ В, частота сигнала $f = 10$ МГц

При добавлении источников сигналов происходит перераспределение амплитуды тока вдоль провода, а также возрастает максимальное значение. По сравнению с одиночным источником U_1 (см. рис. 2, а), наличие источников сигналов $U_2 - U_4$ привело к увеличению амплитуды тока на участке ab на 25 %, на участке ef на 60 %, а на участке kl в 10 раз.

На рис. 3, а и рис. 3, б показаны нормированные к максимальному значению распределения электромагнитного поля внутри помещения, планиров-

ка которого приведена на рис. 1. Расчет выполнен на основе волноводной модели беспроводных каналов связи внутри зданий для распределенных источников сигналов с учетом полученных распределений тока [6, 7].

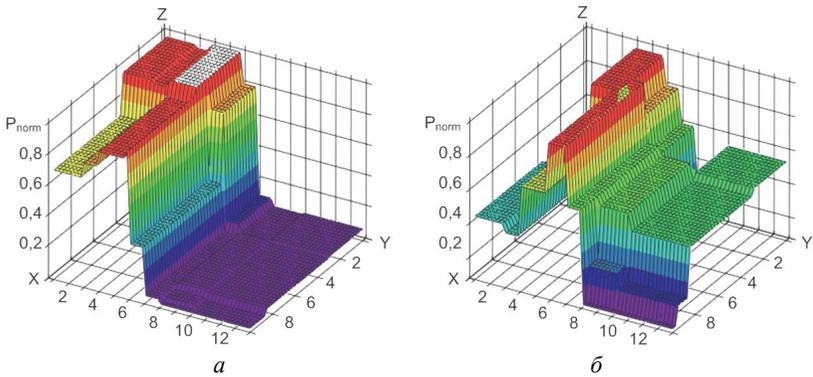


Рисунок 3 – Нормированные распределения электромагнитного поля для распределений токов, приведенных на рис. 2

Поскольку мощность излучаемого сигнала пропорциональна квадрату амплитуды тока $P \sim I^2$, максимумы электромагнитного поля зафиксированы в блоках, в которых сформировано максимумы токов (ср. рис. 2, *a* – рис. 2, *б* и рис. 3, *a* – рис. 3, *б*). Причем, с ростом амплитуды токов на участках *ef* и *kl* (см. рис. 2, *б*), происходит перераспределение максимумов мощности сигналов. В результате их относительные уровни в блоках с 0-го по 4-й уменьшаются на 30 – 50 %, а в блоках с 7-го по 18-й, соответственно увеличиваются на 10 – 45 %.

Сравним полученные распределения сигналов, создаваемых проводно-беспроводной сетью, использующей электрические провода, с распределением сигнала, излучаемым точкой доступа Wi-Fi, расположенной в 0-м блоке. На рис. 4, приведено нормированное распределение сигнала, полученное с использованием волноводной модели беспроводных каналов внутри зданий для точечных источников сигнала. Нормирование выполнено для удобства сравнения полученных результатов.

На рис. 4 видно, что для Wi-Fi сети максимум сигнала приходится на блок, в котором расположен источник сигнала, и убывает по мере удаления от него.

Для проводно-беспроводной сети с четырьмя источниками сигнала и распределением тока, показанном на рис. 2*б*, распределение излучаемой мощности внутри помещений более равномерное, что обеспечивает устойчивую передачу сигнала, практически исключает наличие «мертвых зон», а также увеличивает отношение сигнал/шум до значения, достаточного для обусловленного качества обслуживания сети.

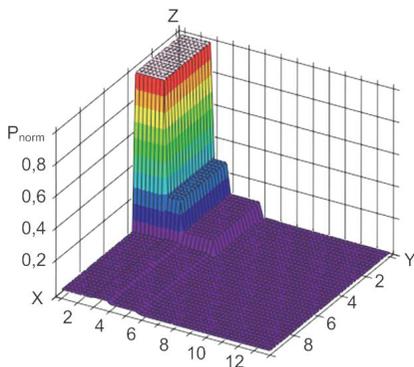


Рисунок 4 – Нормированное распределение электромагнитного поля для Wi-Fi сети с источником сигнала в 0-м блоке

3. Обеспечение ЭМС PLC сетей и производственного оборудования

Одна из главных проблем, возникающих при построении PLC сетей, – отсутствие стандарта, регламентирующего уровень помехоэмиссии [8]. Отчасти это ограничивает широкое распространение данной технологии, так как достаточно сложно предсказать, как повлияет непреднамеренное высокочастотное излучение линий электропитания на производственное оборудование.

Более того, так как линии электропитания по сути – это распределенные проволочные излучатели, общепринятая методика расчета и измерения напряженности поля радиопомех, например, из стандарта CISPR 22 [9], в ряде случаев неприменима.

Тогда, в случае необходимости, для обеспечения совместимости PLC сетей и производственного оборудования целесообразно принимать дополнительные меры по ослаблению нежелательной помехоэмиссии, а также формирования заданного распределения электромагнитного поля (необходимого для устойчивого беспроводного обмена).

Рассмотрим комплекс возможных мероприятий на примере проводно-беспроводной сети внутри помещений А, В и С, показанной на рис. 5.

В данном случае для уменьшения влияния PLC сетей на производственное оборудование, а также обеспечения заданного распределения поля применяют дополнительные экранирующие и поглощающие покрытия. В точках, где необходимо организовать беспроводный обмен, экранирование не нужно.

Передача сигналов осуществлена между устройствами 7, 8, 9 по электрическим проводам (ломаная $A_1 A_2 \dots A_7$), проложенными внутри стены 2, через электрические розетки 1 (с устройством 9) и посредством излучения (с устройствами 7, 8).

В блоке А устройство 7 взаимодействует с электрическими проводами

посредством беспроводного обмена. Для предотвращения проникновения электромагнитных сигналов из блока А используются сборные стальные панели. Выбор стальных панелей обусловлен высоким значением ослабления сигнала (в зависимости от толщины панели до 60...100 дБ) [10, 11] и простой их монтажа. Для предотвращения проникновения электромагнитных сигналов в блок С через дверной проем используют стальные двери. Вблизи устройства 7 в точке, где необходимо получить максимум сигнала, панели не применяют, что бы обеспечить беспроводный обмен.

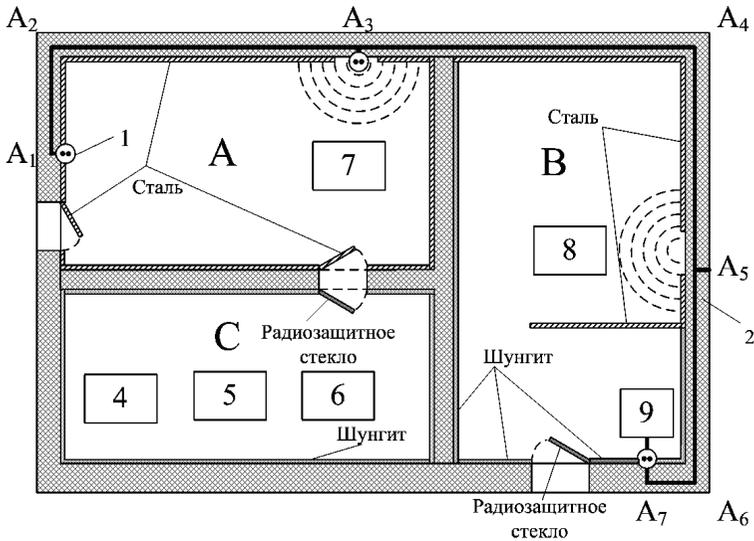


Рисунок 5 – Пример организации беспроводного обмена внутри помещения

Для устройств 4, 5, 6 необходимо минимизировать воздействие внешних электромагнитных полей, поэтому стены в блоке С покрыты магнезиально-шунгитовыми смесями [12]. Это позволяет ослабить сигнал, поступающий извне и минимизировать переотражения сигналов, создаваемых самими устройствами. С этой же целью дверь в блоке выполнена из поглощающего радиозащитного стекла, ослабляющего сигнал на 20 – 40 дБ [10, 11, 13].

В блоке В в устройстве 8 реализовано беспроводный обмен через электрические провода. Поэтому, чтобы сконцентрировать электромагнитное поле вблизи него, фронтальная и боковая стены выполнены из стальных панелей. Задняя стенка выполнена из шунгита, чтобы исключить переотражения сигнала в направлении устройства 9, которое связано с проводами через розетку. Для этого же установлена стальная перегородка между устройствами 8 и 9.

Выводы. Сравнение возможностей использования Wi-Fi и проводно-беспроводных PLC сетей показало, что и те и другие могут использоваться

при построении технологических сетей.

Основными преимуществами технологии Wi-Fi являются ее широкое распространение и большая скорость передачи. Наибольший уровень сигнала, и, соответственно, устойчивый беспроводный обмен данными достигается вблизи точки установки приемопередатчика. При этом передача сигнала к/от данного приемопередатчика осуществляется по специальным сигнальным линиям (витой паре, оптическому волокну и др.)

PLC сети позволяют обеспечить комбинированное решение: передачу по проводам и беспроводную передачу данных. Данная технология не требует прокладки дополнительных сигнальных линий. Электрические провода могут использоваться непосредственно как сигнальные линии и как приемопередающие антенны. Однако требуемое распределение электромагнитного поля для PLC сетей достигается при использовании дополнительных экранирующих средств.

Список литературы: 1. *Парк Дж.* Передача данных в системах контроля и управления: практическое руководство / *Дж. Парк, С. Маккей, Э. Райт*; [перевод с англ. *В.В. Савельева*]. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 480 с. 2. *Кученко Ю.* Домашние сети на электропроводах – время пришло? / *Ю. Кученко* // Компьютерное обозрение. – 2003. – № 18-19. – Режим доступа: <http://itc.ua/13524>. 3. HomePlug AV White Paper / HomePlugPowerline Alliance. – 2005. – Режим доступа: <http://www.homeplug.org/products/whitepapers>. 4. 802.11n Primer White Paper / AirMagnet Wireless Network Assurance. – August 05, 2008. – Режим доступа: <http://airmagnet.flukenetworks.com/assets/whitepaper/WP-802.11nPrimer.pdf>. 5. 802.11n: Next Generation Wireless LAN Technology White Paper / Broadcom Connecting. – April, 2006. – Режим доступа: http://www.broadcom.com/collateral/wp/802_11n-WP100-R.pdf. 6. *Гуреев А.В.* Волноводная модель беспроводных каналов связи внутри зданий / *А.В. Гуреев, В.А. Кустов* // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2002. – Т. 5. – С. 1519 – 1536. – Режим доступа к журн.: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/135.pdf>. 7. *Жуйков В.Я.* Поле ближней зоны проводов электропитания в системе передачи данных / *В.Я. Жуйков, А.Ф. Розвадовский* // Техническая электродинамика. – 2008. – № 1. – С. 12 – 16. 8. *Pilinsky V.V.* Mathematical Model of Electromagnetic Field Radiated by Indoor PLC Systems / *V. V. Pilinsky, A. F. Rozvadovskiy, Ie. S. Zaitsev* // International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE – 2013), Brugge, Belgium. – 2-6 Sept. 2013. – PP. 822 – 827. 9. CISPR 22, Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement / IEC, edition 6.0, 2008-09. 10. *Островский О.С.* Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / *О.С. Островский, Е.Н. Одаренко, А.А. Шматько* // ФИП. – 2003. – Т. 1, № 2. – С. 161-173. – Режим доступа: <http://www.bnti.ru/dbtexts/ipks%5Calex27%5Ccodarenko.pdf>. 11. *Бацула А.П.* Конструирование радиоэлектронных устройств: Учебное пособие. // *А.П. Бацула*. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002. – 231 с. 12. *Байдин Ф.Н.* Электрофизические характеристики и радиоэкранирующие свойства магнетитно-шунгитовых композиционных строительных материалов / *Ф.Н. Байдин, В.Н. Никитина, Н.Б. Сафронов* // Сб. докл. Девятой Российской научн.-техн. конф. по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. – СПб, 2006. – С. 292-294. 13. *Аноллонский С.М.* Справочник по расчету электромагнитных экранов / *С.М. Аноллонский*. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 224 с.

Bibliography (transliterated): 1. Park Dzh. Peredachadannyh v sistemah kontrolja i upravlenija: prakticheskoe rukovodstvo. Dzh. Park, S. Makkej, Je. Rajt; [perezod s angl. V.V. Savel'eva]. Moscow: ООО «Группа ИДТ», 2007. 480 s. Print. 2. Kuchenko Ju. Domashnie seti na jelektroprovodah – vremja prishlo? Ju. Kuchenko. Komp'juternoe obozrenie. 2003. №18-19. Rezhim dostupa: <http://itc.ua/13524>. 3. HomePlug AV White Paper. HomePlugPowerline Alliance. 2005. Rezhim dostupa:

<http://www.homeplug.org/products/whitepapers>. 4. 802.11n Primer White Paper. AirMagnet Wireless Network Assurance – August 05, 2008. Rezhim dostupa: <http://airmagnet.flukenetworks.com/assets/whitepaper/WP-802.11nPrimer.pdf>. Print. 5. 802.11n: Next Generation Wireless LAN Technology White Paper. Broadcom Connecting – April, 2006. Rezhim dostupa: http://www.broadcom.com/collateral/wp/802_11n-WP100-R.pdf. 6. Gureev A.V. Volnovodnaja model' besprovodnyh kanalov svjazi vnutri zdaniij. A.V. Gureev, V.A. Kustov. Jelektronnyj zhurnal «Issledovano v Rossii». 2002. T. 5. S. 1519-1536. Rezhim dostupa k zhurn.: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/135.pdf>. 7. Zhujkov V.Ja. Pole blizhnej zony provodov jelektropitanija v sisteme peredachi dannyh. V.Ja. Zhujkov, A.F. Rozvadovskij. Tehniceskaja jelektrodinamika. 2008. № 1. S. 12-16. Print. 8. Pilinsky V.V. «Mathematical Model of Electromagnetic Field Radiated by Indoor PLC Systems». V. V. Pilinsky, A. F. Rozvadovskiy, Ie. S. Zaitsev. International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE – 2013), Brugge, Belgium – 2-6 Sept. 2013. PP.822-827. Print. 9. CISPR 22, Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. IEC, edition 6.0, 2008-09. Print. 10. Ostrovskij O.S. Zashhitnye jekrany i poglotiteli jelektromagnitnyh voln. O.S. Ostrovskij, E.N. Odarenko, A.A. Shmat'ko. FIP, 2003, tom 1, № 2. S. 161-173. Rezhim dostupa: <http://www.bnti.ru/dbtexts/ipks%5Calex27%5Codarenko.pdf>. 11. Bacula A.P. Konstruirovanie radiojelektronnyh ustrojstv: Uchebnoe posobie. A.P. Bacula – Tomsk: Tomskij mezhvuzovskij centr distancionnogo obrazovanija, 2002. 231 s. Print. 12. Bajdin F.N. Jelektrofizicheskie harakteristiki i radiojekranirujushhie svojstva magnezial'no-shungitovyh kompozicionnyh stroitel'nyh materialov. F.N. Bajdin, V.N. Nikitina, N.B. Safronov. Sb. dokl. Devjatoj Rossijskoj nauchn.-tehn. konf. po jelektromagnitnoj sovmestimosti tehniceskikh sredstv i jelektromagnitnoj bezopasnosti. SPb.: 2006. S.292-294. Print. 13. Apollonskij S.M. Spravochnik po raschetu jelektromagnitnyh jekranov. S.M. Apollonskij. L.: Jenergoatomizdat., Leningr. otd-nie, 1988. 224 s. Print.

Поступила (received) 21.10.2014

УДК 621.317.3

В.В. РУДАКОВ, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
А.А. КОРОБКО, аспирант НТУ «ХПИ»

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ ВЛАГИ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМЕ

Приведено описание коаксиальной конструкции измерительного преобразователя для определения низких концентраций влагосодержания в трансформаторном масле. Представлены результаты определения влагосодержания при малых концентрациях 0,1%- 2% по методике, основанной на использовании диэлькометрического метода в резонансном режиме. Методика позволяет рассчитывать влагосодержание по результатам измерения собственных резонансных частот для двух вариантов заполнения измерительного преобразователя: чистым маслом, испытываемым маслом и при отключенном измерительном преобразователе. Приведены погрешности измеренных частотомером ЧЗ-34 резонансных частот и влагосодержания испытываемого масла с известной заранее концентрацией воды.

© В. В. Рудаков, А. А. Коробко, 2014

Ключевые слова: влага, трансформаторное масло, эмульсия, диэлькометрический метод, резонансный метод, измерительный преобразователь.

Введение. Экспресс анализ влагосодержания в нефтяных фракциях (в частности в трансформаторном масле) весьма важен для оценки качества электрической изоляции высоковольтных маслонаполненных аппаратов и оборудования. Существующие методы оценки отличаются значительным временем проведения анализа, дороговизной и необходимостью применения реагентов при исследовании. В [1] был предложен свободный от указанных недостатков диэлькометрический метод определения влагосодержания в трансформаторном масле, основанный на измерении диэлектрической проницаемости резонансным методом.

Техническая реализация данного метода в виде, изложенном в [1], не позволила повысить его чувствительность по величине влагосодержания до уровня меньше 5%, что является недостаточным для диагностики маслонаполненного оборудования.

Целью настоящей работы является увеличение чувствительности диэлькометрического метода измерения влагосодержания, основанного на измерении резонансных частот LC контура.

Основная часть. Проведенный анализ путей повышения чувствительности диэлькометрического метода в резонансном режиме выявил три основных направления решения поставленной задачи.

1. Усовершенствование конструкции измерительного преобразователя. В отличие от измерительного преобразователя в виде плоского конденсатора, использованного в [1], в данной работе был применен измерительный преобразователь коаксиального типа (рис.1).

Такой тип измерительного преобразователя (с заземлением внешнего электрода 2) позволил существенно уменьшить электрические наводки на измерительном преобразователе и увеличить его чувствительность к изменению влагосодержания в порции масла, заливаемого между электродами 2 и 3 в вертикальном положении преобразователя.

Кроме этого, приведенная конструкция измерительного преобразователя позволила существенно увеличить его чувствительность за счет оптимизации соотношения электрических емкостей различных его участков

Так рабочая часть емкости измерительного преобразователя определяет емкость между коаксиальными электродами 2 и 3 на участках 3 и 4. При этом обе емкости этих участков являются "рабочими" несмотря на то, что они имеют разную величину.

Суммарная емкость измерительного преобразователя (которая подключена параллельно индуктивности генератора) определяется суммой емкостей измерительного преобразователя на участках 1 - 4. Приведенная конструкция измерительного преобразователя при выполнении диэлектрической шайбы 4 из неполярного диэлектрика в виде фторопласта-4 (для обеспечения мини-

мальных электрических и адсорбционных потерь) обеспечила следующие величины потери чувствительности измерительного преобразователя за счет наличия конструктивных емкостей на участках **1** и **2** (между опорным фланцем 1 и электродом 3): 6,2 % – для случая незаполненного маслом измерительного преобразователя; 3 % – для случая измерительного преобразователя, заполненного трансформаторным маслом.

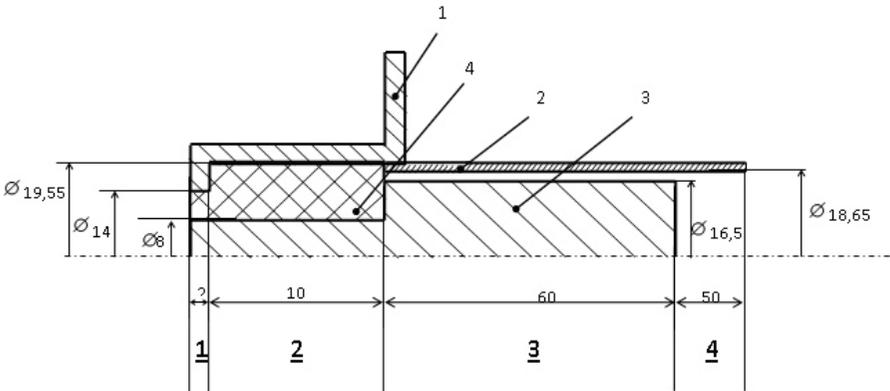


Рисунок 1 – Схематическое изображение измерительной ячейки: 1 – опорный фланец; 2 – внешний электрод; 3 – внутренний электрод; 4 – диэлектрическая шайба

2. Разработка и создание компактного LC генератора, работающего в сборе с измерительным преобразователем.

Особенностью LC генератора является максимальное уменьшение входной паразитной емкости генерирующего узла, которая вместе с параллельно включенной суммарной емкостью измерительного преобразователя является полной емкостью C колебательного контура генератора. Обеспечение минимальной паразитной емкости достигнуто применением компактного генерирующего узла на основе LC генератора с эмиттерной связью в двухкаскадном усилителя совместно с выполнением индуктивного элемента генератора в виде четырехсекционной катушки в одном экранируемом корпусе [2,3]. С помощью 4-х катушек индуктивности возможно генерирование 4-х частот путем ручного переключения.

Применение в конструкции генерирующего узла LC генератора термостабильных элементов совместно с регулируемым стабилизированным источником питания позволило добиться частотной нестабильности генератора не хуже величины 10^{-5} - 10^{-6} . Тем самым повышена стабильность частоты генерирующего узла.

3. Повышение точности измерений, которое обеспечивалось двумя путями: 1) использованием термостабилизированного электронного частотомера ЧЗ-34 с точностью измерения частоты 10^{-7} ; 2) тщательной подготовкой

исследуемых образцов трансформаторного масла.

Подготовка образцов проводилась путем смешивания высушенного трансформаторного масла Т1500 и воды в сверхзвуковом миксере кавитационного типа. Далее образцы помещались в вакуумную камеру для деаэрации. Были исследованы водомасляные эмульсии со следующими величинами влагосодержания: 0,1 %, 0,2 %, 0,5 %, 1 %, 2 %.

Результаты исследования. Для оценки эффективности конструкции измерительного преобразователя было проведено экспериментальное исследование по оценке влияния уровня наполняемости измерительного преобразователя исследуемой эмульсией. При этом было выявлено, что отклонения по частоте генерации LC генератора, обусловленное влиянием погрешности уровня налива не превышает величины нестабильности по частоте генерации LC генератора.

Для каждой концентрации проводилось по 12 измерений частоты при помощи электронного частотомера ЧЗ-34. Результаты измерений обрабатывались согласно методике [3-6]. Каждый образец был исследован на четырех частотах 100 кГц, 500 кГц, 1 МГц, 2 МГц.

Для определения величины влагосодержания в исследуемых эмульсиях были использованы полученные ранее в работе [6] расчетные соотношения между искомым влагосодержанием и частотами генерации генератора:

$$W = \frac{\frac{1}{v_{cm}^2} - \frac{1}{v_m^2}}{3\left(\frac{1}{v_m^2} - \frac{1}{v_0^2}\right)}, \quad (1)$$

где v_0 – частота генерации генератора при отключении измерительного преобразователя; v_m – частота генерации генератора при подключенном измерительном преобразователе и заполнении его сухим маслом; v_{cm} – частота генерации генератора при подключении измерительного преобразователя и заполнении его исследуемой эмульсией; W – концентрация воды, выраженная как отношение объема воды к общему объему эмульсии.

Результаты измерений для режима частоты 100кГц и 2 МГц для концентраций водомасляных эмульсий со следующими величинами влагосодержания: 0,1%, 0,2%, 0,5%, 1%, 2% приведены в табл. 1,2. Значения влагосодержания получены путем подстановки в (1) экспериментальных значений частот $v_0 v_m v_{cm}$.

Анализ данных, представленных в табл. 1, 2 показывает, что режим 100кГц соответствует максимальной стабильности частоты LC генератора (точности измерений), режим 2МГц соответствует максимальной чувствительности данного метода.

Расхождения экспериментальных результатов с теоретическими наглядно представлены на рис 2, 3.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных измерений при режиме 100кГц

$\nu_0, \text{Гц}$	149129,3±2,8				
$\nu_m, \text{Гц}$	114248,0±2,3				
$\nu_{cm}, \text{Гц}$	114140,6 ±0,4	114081,5 ±0,6	113855,5 ±0,9	113503,0 ±1,1	112758,1 ±3,3
$W, \%$	0,14±0,003	0,24±0,003	0,56±0,003	1,06±0,004	2,15±0,006

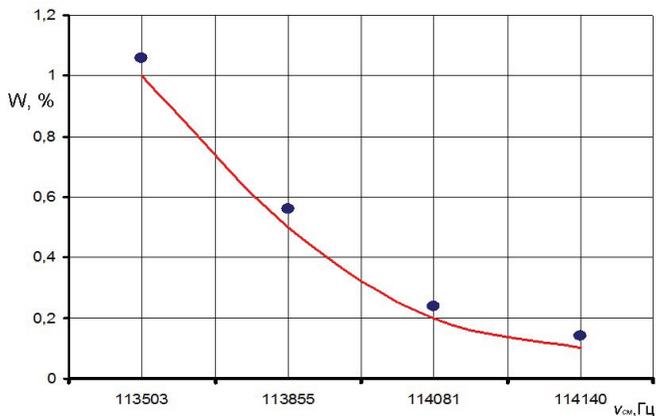


Рисунок 2 – расхождение теоретической кривой зависимости W и экспериментальных результатов для режима 100кГц от частоты ν_{cm} , (точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – теория [6])

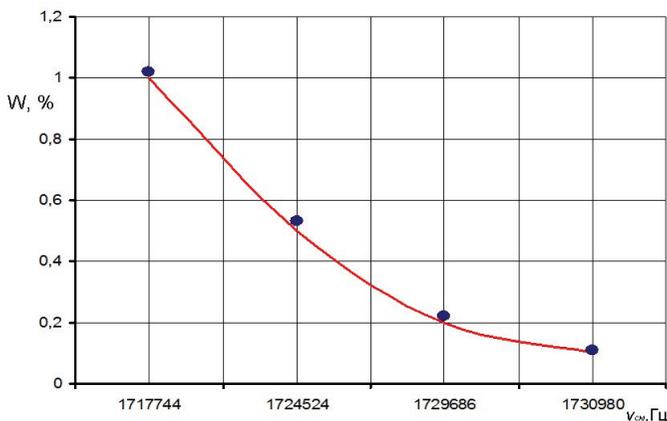


Рисунок 3 – расхождение теоретической кривой зависимости W и экспериментальных результатов для режима 2МГц от частоты ν_{cm} , (точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – теория [6]).

Таблица 2 – Экспериментальные результаты при режиме 2МГц.

$v_0, \text{Гц}$	2656831,5 \pm 7,6				
$v_m, \text{Гц}$	1732601,4 \pm 1,4				
$v_{cm}, \text{Гц}$	1730980,4 \pm 1,3	1729686,2 \pm 2,3	1724524,7 \pm 2,0	1717744,8 \pm 9,5	1703036,7 \pm 26,3
W, %	0,11 \pm 0,0001	0,20 \pm 0,002	0,55 \pm 0,0001	1,0 \pm 0,0007	2,03 \pm 0,002

Выводы. По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Усовершенствование конструкции измерительного преобразователя совместно с техническими решениями по повышению стабильности частоты LC генератора позволили поднять чувствительность диэлькометрического метода измерения влагосодержания в трансформаторном масле путем изменения частот более чем в 50 раз (с 5 % до 0,1 %).

2. В области малых величин влагосодержания подтверждена корректность модели эмульсии масло-вода, разработанная авторами и проверенная ранее для больших величин влагосодержания.

3. Определены частоты генерации LC генератора, соответствующие максимальной чувствительности метода и максимальной стабильности (точности) измерения влагосодержания данным методом.

Список литературы: 1. Рудаков В.В., Коробко А.И., Коробко А.А. Диэлектрический метод определения влагосодержания в эмульсиях типа минеральное масло – вода с использованием электрофизической модели эмульсии инженерного типа // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – № 39. – С. 154-158. 2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. – 5-е изд., перераб. – М.: Мир, 1998. – 704 с. 3. Беленецкий Х.С. Приставка для измерения индуктивностей в практике радиолюбителя / Беленецкий Х.С. // Радио. – 2005. – № 5. – С. 26-28. 4. Обработка косвенных измерений Интернет: <http://teachmen.ru/methods/outText.php>. 5. Дворяшин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с. 6. Обработка результатов измерений Интернет: http://teachmen.ru/methods/phys_prac6.php. 7. Дворяшин Б.В. Кузнецов Л.И. Радиотехнические измерения. Учеб. пособие для вузов. – М.: Советское радио, 1978. – 360 с. 8. Рудаков В.В., Коробко А.И., Коробко А.А., Электрофизическая модель поведения эмульсии типа минеральное масло – вода инженерного типа // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – № 39. – С. 158-161.

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'skiy politekhnichniy institut». Zbirnik naukovikh prats'. Tematichniy vipusk: Tekhnika i elektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU «KHP». 2009. № 39. 154-158. Print. 2. Khorovits P., Khill U. "Iskusstvo skhemotekhniki". 5-ye izd., pererab. Moscow: Mir, 1998. 704 s. Print. 3. Belenetskiy Kh. S. "Pristavka dlya izmereniya induktivnostey v praktike radiolyubitelya". Belenetskiy Kh. S. Radio. 2005. № 5. S. 26-28. Print. 4. "Obработка kosvennykh izmereniy" Internet:<http://teachmen.ru/methods/outText.php>. 5. Dvoryashin B.V. "Osnovy metrologii i radioizmereniya". Ucheb. posobiye dlya vuzov. Moscow: Radio i svyaz', 1993. 320 s. 6. "Obработка rezul'tatov izmereniy" Internet:

http://teachmen.ru/methods/phys_prac6.php 7. Dvoryashin B.V. Kuznetsov L.I. "Radiotekhnicheskiye izmereniya". Ucheb. posobiye dlya vuzov. Moscow: Sovetskoye radio, 1978. 360 s. Print. 8. Rudakov V.V., Korobko A.I., Korobko A.A., "Elektrofizicheskaya model' povedeniya emul'sii tipa mineral'noye maslo – voda inzhenerenogo tipa". Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivs'kiy politekhnichniy institut». Zbírnik naukovikh prats'. Tematichniy vipusk: Tekhnika í yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU «KHPI». 2009. № 39. S. 158-161. Print.

Поступила (received) 09.10.2014

УДК 004.738.2

В. А. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»;
Т. Я. ГРИЧКОВСКИЙ, магистрант, НТУ «ХПИ»

СИНТЕЗ СМС-КОММУНИКАЦИЙ ЧЕРЕЗ INTERNET

В статье рассмотрены проблемы анализа и синтеза веб-приложений по рассылке СМС-сообщений через Интернет и вопросы разработки методов построения СМС-коммуникаций. Обоснован выбор протоколов и СМС-шлюзов. На Ruby on Rails разработаны программный код веб-приложения с Web- и API (RESTful) интерфейсами, библиотека взаимодействия веб-приложения с СМС-шлюзом и графический интерфейс клиентской части веб-приложения.

Ключевые слова: СМС-коммуникации, СМС-сервисы, СМС-шлюзы, СМС-сообщения, СМС-центры, API, WEB-интерфейс.

Введение. Службы коротких СМС-сообщений на мобильные телефоны приобрели массовую популярность во многих странах мира. К базовым маршрутам СМС-коммуникаций относятся две модели передачи сообщений: первая - с мобильного телефона на другой мобильный телефон или на модем GSM/GPRS, вторая – с приложения на мобильный телефон или на модем GSM/GPRS.

Одним из актуальных направлений СМС-коммуникаций является вторая модель, то есть автоматизированная рассылка СМС-сообщений из прикладных программ или сайтов через СМС-шлюзы (SMS-Gateway) с помощью интерфейса API. СМС-шлюзы взаимодействуют с СМС-центрами (SMSC) мобильных операторов связи, которые предназначены для работы со службой коротких сообщений SMS.

Анализ публикаций. В работе проведен обзор и анализ приложений по рассылке СМС-сообщений через СМС-шлюзы. СМС-шлюзы – это интерфейс

© В. А. Ткаченко, Т. Я. Гричковский, 2014

сы, которые обеспечивают отправку и получение СМС-сообщений без помощи мобильного телефона. В настоящее время наиболее известные следующие типы СМС-шлюзов: WEB2SMS, SMS2EMAIL (EMAIL2SMS), SMS2Skype [1]. Как правило, СМС-шлюзы установлены на сайтах операторов сотовой связи, которые доступны через веб-интерфейс. Например, мобильные операторы Украины [2, 3] на своих официальных сайтах предоставляют возможность отправлять через веб-интерфейс бесплатно СМС для абонентов только своих сетей, но при этом количество СМС ограничено.

Кроме того, СМС-шлюзы используют Интернет-провайдеры массовых СМС рассылок, так называемые СМС-провайдеры, которые охватывают множество СМС-центров (SMSC) мобильных операторов связи во многих странах мира.

СМС-провайдеры предоставляют доступ к СМС-шлюзам через веб-интерфейс [4], а доступ к шлюзу Web2SMS некоторые СМС-провайдеры [5, 6] предоставляют не только через веб-интерфейс, но и через открытый интерфейс API. Именно набор функций API, который предоставляют СМС-провайдеры, обеспечивает возможность подключения приложений к СМС-шлюзу Web2SMS по определенным протоколам. В качестве приложения для интеграции с СМС-шлюзом может быть разработано веб-приложение для корпоративных пользователей. Это веб-приложение может быть размещено на сервере веб-приложений и с этого веб-приложения можно организовать массовую рассылку СМС-сообщений по заданному списку номеров мобильных телефонов сотрудников (абонентов). При этом список номеров мобильных телефонов сотрудников корпорации вводится в базу данных веб-приложения (сайта корпорации), с которого осуществляется рассылка СМС.

В настоящее время наиболее известными протоколами для связи приложений с СМС-шлюзами через интерфейс API являются:

- HTTP/HTTPS;
- SMTP (E-mail);
- SMPP;
- SOAP.

Цель исследования. На основе существующих СМС-шлюзов Интернет провайдеров и СМС-центров мобильных операторов создать новые виды СМС-сервисов с применением современных языков программирования, и определить новые области, в которых можно использовать СМС-коммуникации через Internet.

Постановка проблемы. Разработать веб-приложение (сервис СМС-коммуникаций) с Web- и API (RESTful) интерфейсами, которое должно обеспечивать массовую рассылку СМС по заданному списку номеров абонентов через СМС-шлюзы с помощью терминальных устройств с веб-браузерами или установленными приложениями, которые могут взаимодействовать с веб-сервисами RESTful.

Для интеграции с SMS-шлюзами веб-приложение СМС-коммуникаций должно поддерживать несколько вариантов протоколов:

- SMPP (через API SMPP);
- SMTP (через интерфейс Email2SMS или E-mail to SMS);
- HTTP (через REST HTTP API).

Веб-приложение должно обеспечить три вида сервисов для рассылки на мобильный телефон:

- массовая рассылка СМС;
- создание СМС напоминаний;
- управление персоналом корпорации с помощью СМС.

Веб-приложение предназначено для корпоративных веб-сайтов и для веб-сайтов предприятий различных форм собственности и учреждений.

Материалы и результаты исследований. В работе была рассмотрена модель СМС-коммуникаций, которая обеспечивает массовую рассылку сообщений по заданному списку номеров абонентов с веб-приложения на мобильный телефон или модем GSM/GPRS. Выполнен синтез архитектуры Web SMS-сервисов по рассылке СМС-сообщений, выбор и обоснование СМС-шлюзов, языка программирования и среды разработки. Предложенная схема взаимодействия компонентов СМС-коммуникаций через Internet представлена на рис. 1.

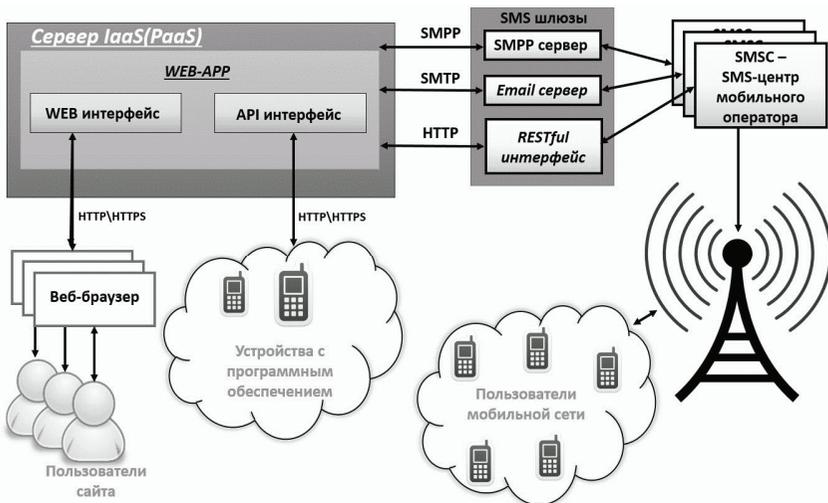


Рисунок 1 – Схема взаимодействия компонентов СМС-коммуникаций через Internet

Веб-приложение (WEB-APP) или динамический веб-сайт должен содержать HTML-страницы, которые предоставляют пользователю возможность регистрироваться, создавать сессию на сайте, добавлять номера телефонов

абонентов (сотрудников) в базу данных и информировать их, выполнять массовую рассылку СМС из сайта, создавать напоминание и т.д.

Пользователь сайта, с помощью своего браузера, может подключиться к серверу приложений на платформе IaaS/PaaS, во всемирной сети, по протоколу HTTP/HTTPS. Сервер приложений, получив запрос, направит его на веб-приложение. Веб-приложение, в зависимости от запроса, будет выполнять соответствующие действия.

Доступ к веб-приложению может быть осуществлен и с мобильных терминальных устройств с веб-браузерами или установленными клиентскими приложениями, которые могут взаимодействовать с веб-сервисами RESTful. Мобильные терминальные устройства, которые могут взаимодействовать с веб-сервисами RESTful, могут взаимодействовать и с веб-приложением, так как оно является RESTful-сервером и предоставляет API (RESTful).

Для рассылки СМС-сообщений с веб-приложения были применены три типа наиболее популярных протоколов: SMPP, HTTP и SMTP. Основным протоколом является SMPP, так как он предоставляет возможность не только принимать и передавать СМС, но и получать уведомления о доставке отправленных сообщений. Этот протокол обеспечивает взаимодействия клиента с СМС-сервером SMS-центра, и обеспечивает высокую скорость передачи сообщений.

Необходимо отметить, что SMPP – это расширяемый протокол обмена сообщениями, ранее известный как Jabber [7]. SMPP основан на XML, является открытым и свободным для использования в качестве протокола мгновенного обмена сообщениями. Протокол SMPP предназначен для передачи XML-данных через Интернет и обеспечивает передачу текстовых сообщений, а также поддерживает передачу голоса, видео и файлов.

В качестве резервного протокола используется протокол HTTP (через REST HTTP API). REST HTTP API предоставляет возможность отправки СМС-сообщений с веб-приложения на RESTful интерфейс СМС-шлюза.

Протокол SMTP предназначен для пересылки на EMAIL2SMS шлюз текстов электронной почты с помощью формы E-Mail (WEB интерфейса) веб-приложения.

Все три протокола SMPP, HTTP и SMTP являются протоколами прикладного уровня, которые используют в качестве транспортного уровня протокол TCP (рис. 2).

Выбор СМС-провайдеров осуществляется из условий экономичности передачи СМС-сообщений и максимального количества подключенных СМС-центров (SMSC) отечественных и зарубежных мобильных операторов.

Для апробации приложения в качестве СМС-шлюза использован GSM SMS Platform компании «ЭС.ЭМ.ЭС. ЦЕНТР УКРАИНА» [8], которая позволяет подключаться к их шлюзу через программный API интерфейс. Для подключения к СМС-шлюзу был использован API-интерфейс и прикладной протокол доступа SMPP. То есть в качестве СМС шлюза использован SMPP сер-

вер компании «ЭС.ЭМ.ЭС. ЦЕНТР УКРАИНА».

Для апробации протокола HTTP (через REST HTTP API) в качестве шлюза использован «SMS-центр: СМС-рассылки по всему миру – SMS шлюз, SMPP сервис, массовая рассылка СМС» [5]

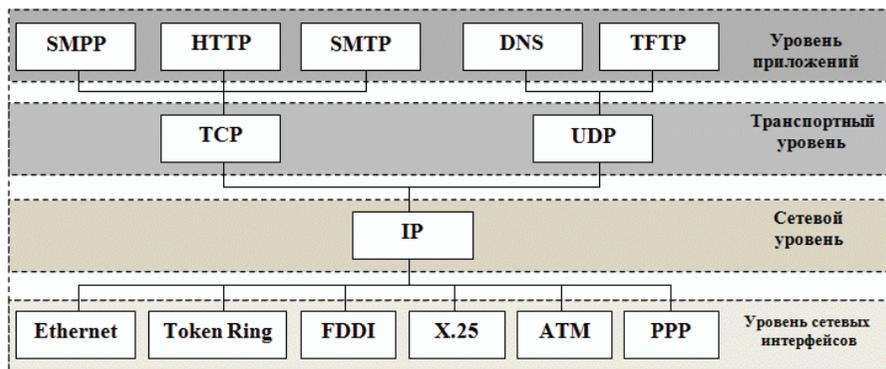


Рисунок 2 – Стек TCP/IP

Для проверки работоспособности веб-приложения при взаимодействии с СМС-шлюзом по протоколу SMTP в качестве СМС-шлюза был использован «Сервис отправки СМС рассылки «Pochta SMS» [6].

При выборе языка программирования было учтено огромное количество факторов (производительность, гибкость языка, целевая платформа, поддержка и т.д.). В итоге для разработки веб-ресурса был выбран фреймворк Ruby on Rails [9]. На Ruby on Rails был разработан программный код веб-приложения, библиотека взаимодействия веб-приложения с СМС-шлюзом и графический интерфейс клиентской части веб-приложения.

Так как веб-приложение должно хранить информацию об абонентах, об истории отправленных СМС и т.д., то необходимо применить СУБД, и соответствующим образом организовать таблицы в базе данных. В качестве СУБД была применена PostgreSQL, так как этот тип СУБД поддерживается облачной платформой PaaS Heroku. Выбор платформы PaaS Heroku для разработки и размещения веб-приложения обоснован тем, эта платформа имеет средства (фреймворк) разработки на языке Ruby и обеспечивает масштабируемость при мгновенном росте нагрузки.

В процессе решения задач были применены методы моделирования взаимодействия компонентов СМС-сервиса, методы программного моделирования серверных компонентов и взаимодействия серверной части веб-приложения с СМС-шлюзом.

Разработанный сервис СМС-коммуникаций был помещен на сервер приложений (App Server) платформы PaaS (Heroku/Salesforce), и доступ к этому сервису может быть осуществлен как через пользовательский интерфейс

(user interface), так и через интерфейс API (RESTful) для мобильных терминальных устройств.

Выводы. Разработанное и апробированное веб-приложение отвечает заданным требованиям. Для разработки использовались современные методы проектирования веб-приложений для инфокоммуникационных систем.

Массовая рассылка текстовых СМС через Интернет является одним из перспективных направлений Web- и СМС-коммуникаций, к которому относится оповещение через СМС.

Например, созданное веб-приложение для рассылки СМС на мобильные телефоны может быть использовано в корпоративных сайтах, интернет магазинах и других сайтах предприятий различных форм собственности и учреждений для массового оповещения своих сотрудников, клиентов, студентов, пациентов и населения.

Список литературы: 1. SMS-шлюз. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki/SMS-шлюз>. – Дата обращения : 18 октября 2014. 2. КИЇВСТАР. Отправка SMS. - Режим доступа : <http://www.kyivstar.ua/ru/zp/sms/>. – Дата обращения : 18 октября 2014. 3. МТС УКРАИНА. Отправка СМС. – Режим доступа : <http://www.mts.com.ua/rus/sendsms.php#a>. – Дата обращения : 18 октября 2014. 4. Отправляйте SMS с SMS PROM. – Режим доступа : <http://www.smsprom.com.ua/>. – Дата обращения : 18 октября 2014. 5. SMS-центр: СМС-рассылки по всему миру - sms шлюз, smpp сервис, массовая рассылка смс. – Режим доступа : <http://smrc.ru/>. – Дата обращения : 18 октября 2014. 6. Сервис отправки СМС рассылки ePochta SMS. – Режим доступа : <http://www.epochta.com.ua/products/sms/>. – Дата обращения : 18 октября 2014. 7. XMPP. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki/XMPP>. – Дата обращения : 18 октября 2014. 8. Компания "ЭС.ЭМ.ЭС. ЦЕНТР УКРАИНА. – Режим доступа: <http://smscentre.com.ua>. – Дата обращения : 18 октября 2014. 9. Тейт Б., Хиббс К. Ruby on Rails. Быстрая веб-разработка. – СПб.: BHV-Петербург, 2008. – 224 с.

Bibliography (transliterated): 1. SMS-shljuz. Web. 18 oktjabrja 2014 <<https://ru.wikipedia.org/wiki/SMS-shljuz>>. 2. KIIVSTAR. Otpravka SMS. Web. 18 oktjabrja 2014 <<http://www.kyivstar.ua/ru/zp/sms/>>. 3. MTS UKRAINA. Otpravka SMS. Web. 18 oktjabrja 2014 <<http://www.mts.com.ua/rus/sendsms.php#a>>. 4. Otpravljajte SMS s SMS PROM. Web. 18 oktjabrja 2014 <<http://www.smsprom.com.ua/>>. 5. SMS-centr: SMS-rassytki po vsemu miru - sms shljuz, smpp servis, massovaja rassylka sms. Web. 18 oktjabrja 2014 <<http://smrc.ru/>>. 6. Servis otkravki SMS rassylki ePochta SMS. Web. 18 oktjabrja 2014 <<http://www.epochta.com.ua/products/sms/>>. 7. XMPP. Web. 18 oktjabrja 2014 <<https://ru.wikipedia.org/wiki/XMPP>>. 8. Kompanija "JeS.JeM.JeS. CENTR UKRAINA. Web. 18 oktjabrja 2014 <<http://smscentre.com.ua>>. 9. Teyt, B., and K. Hibbs. Ruby on Rails. Bystraja veb-razrabotka. Spb.: BHV-Peterburg, 2008. Print.

Поступила (received) 19.10.2014

А.Ю. ЧЕРНУХИН, аспирант, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСНОЙ КОРОНЫ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЯХ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В работе представлены результаты экспериментального исследования амплитудно-временных параметров стримерной короны. Испытания проведены для молниеприемников различной формы поперечного сечения. Определены функциональные зависимости силы тока стримерной короны от величины напряженности электрического поля, в которое молниеприемник помещается. Определены функциональные зависимости силы тока стримерной короны от высоты молниеприемника. Установлены зависимости силы тока короны от напряженности электрического поля и высоты молниеприемника.

Ключевые слова: молниеприемник, электрическое поле, стример, корона, сила тока.

Введение. Как известно, вероятность ориентировки нисходящей отрицательной молнии зависит от интенсивности образования встречного лидера от объектов, попадающих в зону ориентировки [1]. Началу формирования лидера предшествует появление стримеров. По мере приближения грозового облака, за счет сопутствующего электрического поля, на молниеприемнике индуцируется электрический заряд, что обуславливает повышение напряженности поля на вершине молниеприемника и появление коронного разряда. При некотором значении напряженности электрического поля возникают стримерные вспышки.

В качестве устройств молниезащиты широко используются стержневые молниеприемники. Известно [2], что если размеры вершины молниеприемника не превышают критического радиуса, то напряжение пробоя воздушного промежутка для всех форм вершин практически одинаковое (погрешность до 10 %). Однако, важным фактором также является время, за которое произойдет процесс пробоя, так как это может повлиять на место ориентировки молнии.

Кроме упомянутых выше систем, условно называемых «пассивными», в мире предпринимаются настойчивые попытки создания «активных» устройств молниезащиты. К числу таких устройств относятся, так называемые «Early streamer emission air terminals» (ESE), которые должны обеспечивать более быстрое по сравнению с классическим стержневым молниеприемником создание встречного стримера, способствующего перехвату молнии. Изготовители ESE молниеприемников утверждают, что они обеспечивают существенное увеличение размеров зоны защиты при той же высоте установки.

Число различных вариантов ESE молниеприемников, представленных на рынке услуг, из года в год неуклонно растет. На международной выставке

«Elcom 2013», прошедшей в Киеве, более 20 компаний предлагали ESE молниеприемники. По информации, размещенной на сайте ILPA, в мире уже установлено более полумиллиона таких устройств. Методика аттестации «активных» средств молниезащиты регламентируется стандартом Франции [3]. На основании большого числа экспериментальных исследований доказано [4], что знание средне арифметического значения ΔT не является достаточным для оценки вероятности перехвата молнии ESE молниеприемником.

Поэтому, исследования зависимости параметров стримеров от геометрии молниеприемника и внешних условий, при которых формируются стримеры, представляется актуальной задачей для оценки эффективности систем молниезащиты.

Цель работы. Экспериментальное исследование амплитудно-временных параметров силы тока одиночных стримеров и частоты их возникновения для стержневого молниеприемника в зависимости от напряженности электрического поля, высоты молниеприемника и формы его вершины.

Результаты экспериментальных исследований. Для экспертной оценки «быстродействия» конкретного молниеприемника в работе [5] предложено использовать значения параметров стримеров, которые возникают при размещении молниеприемника в электрическом поле. Результаты исследований на постоянном напряжении, позволяющие оценить характеристики конкретного молниеприемника при подходе грозового облака, представлены в работе [6]. Другая часть исследований связана с изучением процессов образования стримеров в условиях изменяющейся напряженности электрического поля, характерных для поля, сопровождающего прорастающий канал молнии.

Определение критического значения напряженности электрического поля, при котором возникают стримерные вспышки, и характер их поведения при изменении уровня напряженности электрического поля является важным моментом в исследовании молниеприемников. Моделирование процесса осуществлено на высоковольтном испытательном стенде ВВС-1.2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ».

Исследования проведены для стержневых молниеприемников, размещавшихся между двумя параллельными металлическими плоскостями. Размеры плоскостей: нижняя – 4,02 x 6,56 м, верхняя – 3,63 x 5,22 м. Схема испытательной установки для исследования характеристик тока короны при постоянном напряжении приведена на рис. 1. В данном варианте нижняя плоскость заземлена. Верхняя – потенциальная, на нее подается высокое напряжение (ВН). Расстояние (S) варьировалось от 0,5 м до 2,5 м. Соответственно, изменялось и начальное значение напряженности электрического поля в промежутке.

Напряжение на потенциальном электроде плавно поднималось до 180 кВ, удерживалось некоторое время (около 30 секунд), достаточное для регистрации силы тока начальной короны, затем осуществлялось отключение

источника питания. Далее происходил спад напряжения на конденсаторах в RC цепи источника ВН, а, следовательно, и на исследуемом промежутке. С помощью шунта сопротивлением 75 Ом и осциллографа регистрировался ток, протекающий в системе молниеприемник - плоскость. На второй канал осциллографа подавалось напряжение с омического делителя, установленного непосредственно на выходе ПВУ.

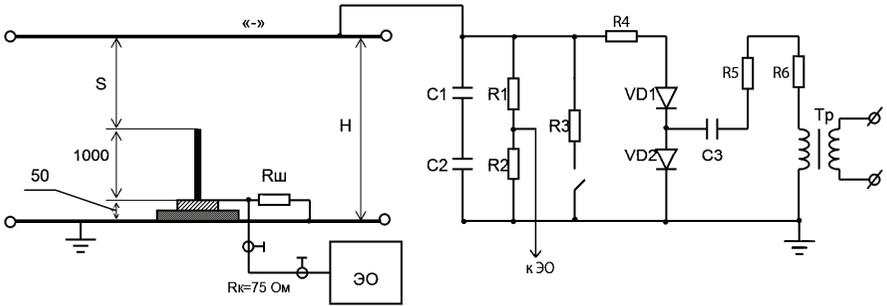


Рисунок 1 – Схема испытательной установки:

$C1 = 0,381 \text{ мкФ}$; $C2 = 0,385 \text{ мкФ}$; $C3 = 0,4 \text{ мкФ}$; $R1 = 300 \text{ МОм}$; $R2 = 30 \text{ кОм}$; $R3 = 60 \text{ кОм}$; $R4 = 510 \text{ кОм}$; $R5, R6 = 60 \text{ кОм}$; $Rш = 75 \text{ Ом}$; $Rк = 75 \text{ Ом}$; Tr – трансформатор ИОМ 100/25

На осциллограмме (рис. 2), максимальное значение напряжения, соответствующее горизонтальной линии на нижней кривой, равно 180 кВ. Коэффициент деления примененного делителя равен 10^4 . Соответственно, чувствительность схемы измерения напряжения 50 кВ/дел. Чувствительность схемы измерения силы тока короны 80 мА/дел.

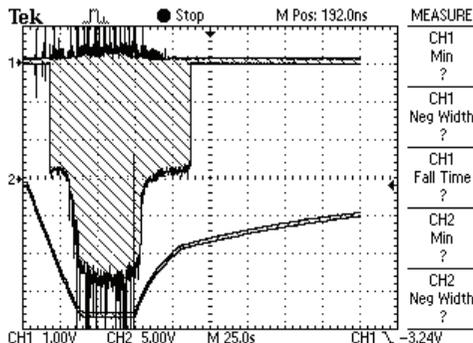


Рисунок 2 – Осциллограмма силы тока коронного разряда при изменении напряжения на потенциальной плоскости

Осциллограмма тока единичного стримера представлена на рис. 3. Влияние уровня напряженности электрического поля на параметры тока ко-

роны иллюстрируется осциллограммами, приведенными на рис. 4. Из осциллограмм видно, что с увеличением напряженности электрического поля в промежутке, изменяется характер наблюдаемого процесса коронного разряда.

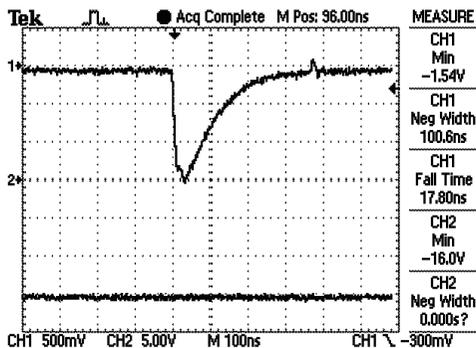


Рисунок 3 – Осциллограмма единичного стримера

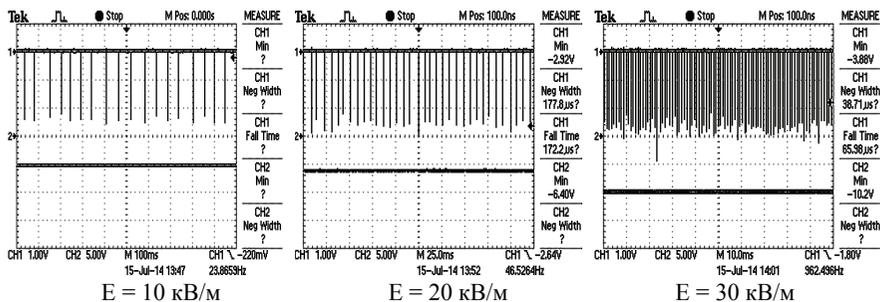


Рисунок 4 – Зависимость частоты следования стримеров от напряженности электрического поля

Таблица 1 – Результаты исследования для стержней высотой 3,4 м

Круглый острый, Ø10мм			
E, кВ/м	q имп, нКл	N, 1/с	I, нА
3,61	0,24	30	7,2
5,15	0,27	600	162
6,19	0,27	1140	307,8
10,31	0,29	2840	823,6
15,46	0,33	2800	924
20,62	0,79	3000	2370
24,74	0,93	3300	3069
30,93	1,6	2800	4480

Квадрат 12x12мм			
E, кВ/м	q имп, нКл	N, 1/с	I, нА
10,78	3,06	18	55,08
12,37	3,33	140	466,2
15,46	3,46	360	1245,6
20,62	3,73	960	3580,8
24,74	3,73	1640	6117,2
30,93	3,79	3000	11370
37,11	3,86	4200	16212

Амплитуда регистрируемого тока начальной короны не изменяется для данной напряженности, тогда как ток короны, обусловленный изменяющим-

ся электрическим полем, растет с увеличением напряженности E -поля.

Эти результаты важны для правильного понимания получаемой при исследованиях молниеприемников информации. То, что может быть принято за стримерную корону, на больших промежутках ($>2\text{ м}$, $E_0 < 60,0 \text{ кВ/м}$), фактически ей не является, а есть лишь начальная корона.

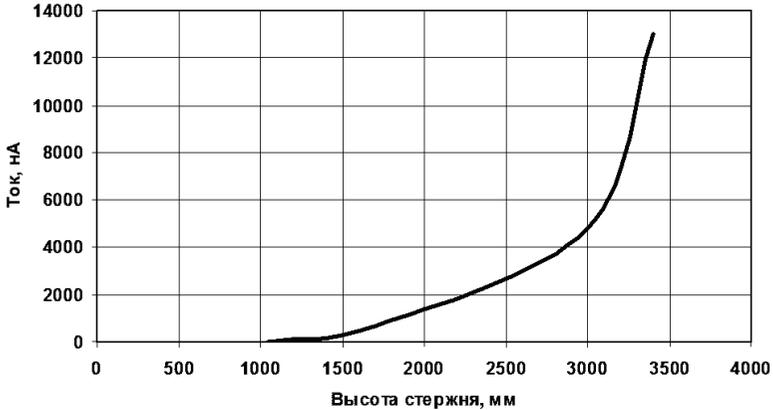


Рисунок 5 – Сила тока стримерной короны в зависимости от высоты стержня (стержень квадратного сечения $12 \times 12 \text{ мм}^2$)

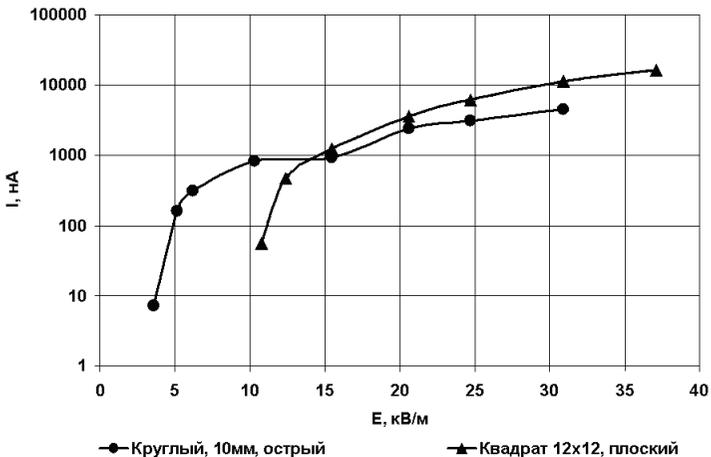


Рисунок 6 – Сила тока короны в зависимости от напряженности электрического поля

Аналогично сила тока стримерной короны зависит от высоты стержня. График такой зависимости представлен на рис. 5. Сила тока определена как средне-арифметическое значения заряда в единичном стримере умноженное на число стримеров во временном интервале равном одной секунде.

Зависимость силы тока короны от напряженности электрического поля в испытательном промежутке для стержня квадратного сечения с плоской вершиной и круглого заостренного показана на рис. 6. Стержневые молниеприемники имели высоту 3,4 м, потенциальная плоскость находилась на высоте 5 м над заземленной.

Исходные данные для построения зависимости представлены в табл. 1.

Выводы.

1. Определены функциональные зависимости силы тока стримерной короны от величины напряженности электрического поля, в которое молниеприемник помещается.

2. Определены функциональные зависимости силы тока стримерной короны от высоты молниеприемника.

3. Предложен метод исследования параметров тока короны молниеприемников в условиях электрического поля, изменяющегося по экспоненциальному закону.

4. Установлено, что временные параметры одиночного стримера не изменяются более чем на 30%. Число импульсов в единицу времени экспоненциально увеличивается по мере увеличения напряженности электрического поля и высоты молниеприемника.

Список литературы: 1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001. – 320с. 2. Lightning protection / Ed. By Vernon Coorey // IET Power and Energy Series 58, UK, London.: 2010, P.1070. 3. NF C 17-102: 2011. Lightning protection. Protection of structures and open areas against lightning using early streamer emission air terminals. 4. Князев В.В., Кравченко В.И., Лесной И.П и др. Результаты исследования параметров активных молниеприемников и рассеивателей // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2008. – Вып. 21. – С. 78-87. 5. Розробка методу оцінки захисних властивостей новітніх видів пристроїв блискавкозахисту – активних блискавкоприймачів та розсіювачів / Звіт про НДР Inv.0212U008336. – Х.: ХПІ, 2012. – 234 с. 6. Князев В.В., Мельников П.Н., Чернухин А.Ю. Характеристики стримерной короны при постоянном напряжении на молниеприемниках с различными формами вершин и поперечных сечений // Вестник НТУ «ХПИ» «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2012. – Вып. 21. – С. 111-117.

Bibliography (transliterated): 1. Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Fizika molnii i molniezashchity. Moscow: FIZMATLIT, 2001. 320 s. Print. 2. Lightning protection. Ed. By Vernon Coorey. IET Power and Energy Series 58, UK, London.: 2010. P.1070. Print. 3. NF C 17-102: 2011. Lightning protection. Protection of structures and open areas against lightning using early streamer emission air terminals. Print. 4. Knjazev V.V., Kravchenko V.I., Lesnoj I.P i dr. Rezultaty issledovanija parametrov aktivnyh molniepriemnikov i rasseivatelej, Vestnik NTU «HPI» «Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij», Vyp. 21, 2008, s.78-87. Print. 5. Rozrobka metodu ocinki zahisnih vlastivostej novitnih vidiv pristroiv bliskavkozahistu – aktivnih bliskavkoprijmachiv ta rozsijuvachiv. Zvit pro NDR Inv.0212U008336. HPI, Kharkiv. 2012, 234 s. Print. 6. Knjazev V.V., Mel'nikov P.N., Chernukhin A.Ju. Harakteristiki strimernoj korony pri postojannom naprjazhenii na molniepriemnikah s razlichnymi formami vershin i poperechnyh sechenij, Vestnik NTU «HPI» «Tehnika i jelektrofizika vysokih naprjazhenij», Vyp. 21, 2012, s.111-117. Print.

Поступила (received) 24.10.2014

С.П. ШАЛАМОВ, студент, НТУ «ХПИ»

ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Проведен обзор методов измерения импульсных магнитных полей (ИМП). Описаны принципы действия датчиков ИМП на основе эффектов Холла, Фарадея, магнитосопротивления а также метод с использованием феррозонда. Разъяснены особенности применения датчиков ИМП, приведены их преимущества и недостатки. Также рассмотрен метод на основе электромагнитной индукции. Разъяснен принцип конструирования датчика.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, эффект Холла, эффект Фарадея, эффект магнитосопротивления, феррозонд, электромагнитная индукция.

Введение. В некоторых областях современной науки и техники необходимо проводить измерения амплитудно-временных характеристик ИМП. На сегодня существует несколько основных методов измерения: индукционный метод, метод феррозонда, методы с использованием эффекта Холла, Фарадея, магнитосопротивления.

Датчик на основе эффекта Холла. Если пластину, по которой течет ток, поместить в магнитное поле, то в поперечном направлении пластины возникает разность потенциалов. В этом и заключается эффект Холла. Если направление тока, магнитного поля и возникающей разности потенциалов взаимно перпендикулярны, то напряжение равно:

$$U_H = \frac{R_H}{L_H} I_R B = \frac{R_H}{\eta} \frac{L_U}{L_I} U_R B, \quad (1)$$

где R_H – постоянная Холла; I_R – ток через пластину; B – магнитная индукция; U_R – приложенное к пластине напряжение; η – удельное сопротивление; L_U , L_I , L_H – размеры пластины.

Электроды должны располагаться вдоль эквипотенциальных линий чтобы избежать падения потенциала.

Постоянная Холла зависит от свойств материала, из которого изготовлен датчик и концентрации носителей тока.

Напряжение, вызванное эффектом Холла, пропорционально приложенному магнитному полю, поэтому этот эффект может быть использован для измерения магнитного поля.

Физическая основа эффекта Холла заключается в следующем. Движение электрических зарядов в проводнике есть электрический ток. Внешнее магнитное поле проникает внутрь проводника. Следовательно, электроны, двигаясь внутри неподвижного проводника, двигаются и в магнитном поле. На

каждый из них будет действовать сила в направлении, перпендикулярном магнитному полю, и направлению движения. Сила тем больше, чем больше магнитное поле и чем больше их скорость. Связь между этими величинами задается выражением:

$$F = \frac{e}{c} [v \times H], \quad (2)$$

где e – заряд электрона; c – скорость света.

Причиной движения электронов вдоль проводника является сила, определяемая напряжением, приложенным к проводнику. Это напряжение создает внутри проводника электрическое поле, под воздействием которого двигаются электроны. Суммарная сила, действующая на заряд в электрическом и магнитном полях называется силой Лоренца. Выражение (2) является только частью этой силы, связанной с магнитным полем. Сила Лоренца действует под углом 90 градусов относительно направления тока. Электроны прижимаются к краю проводника. Если у одного из краев проводника образуется их скопление, возникнет разница потенциалов. Электроны отклоняются в направлении силы до тех пор, пока их скопление не станет отталкивать новые с силой, равной по величине силе Лоренца, то есть сила Лоренца уравновесит электрическим отталкиванием:

$$eE = \frac{e}{c} [v \times H]. \quad (3)$$

Техническое использование эффекта Холла усложняется поиском веществ, в которых электроны могут двигаться с большими скоростями. Приложенное к телу напряжение определяет скорость движения электронов. Для того, чтобы к телу можно было приложить большое напряжение, необходимо, чтобы его сопротивление было как можно выше. Поэтому оптимальным вариантом является материал с большим сопротивлением и большой подвижностью носителей заряда. Этим требованиям соответствуют некоторые виды полупроводников.

Коэффициентом передачи датчика Холла является отношение полученного напряжения к приложенному при определенной геометрии проводящего тела и может быть определено:

$$\frac{U_H}{U_R} = \frac{\mu H}{cL_1/L_U}, \quad (4)$$

где μ – подвижность носителей заряда; U_H – электродвижущая сила Холла; U_R – ЭДС, приложенная к пластине.

Основными недостатками, препятствующими применению данного метода для ИМП, являются следующие: слабая помехозащищенность, недостаточный амплитудный и частотный диапазон, сильная зависимость константы Холла от температуры окружающей среды, необходимость автономного источника питания и вследствие этого громоздкость вспомогательных устройств прибора.

Применяют данный метод для измерения нестационарных магнитных полей с амплитудой от сотен до десятков тысяч А/м и частотой до 200 кГц (при питании постоянным током).

Метод с использованием эффекта Фарадея. Метод основан на использовании явления вращения плоскости поляризации плоскополяризованного светового луча, проходящего через некоторые магнитоактивные вещества, помещенные в магнитное поле. Это явление имеет место при распространении света вдоль направления напряженности магнитного поля.

$$\alpha = V \cdot H \cdot l, \quad (5)$$

где α – угол поворота плоскости поляризации; l – длина светового пути в веществе; V – константа Верде.

Постоянная Верде зависит от природы вещества, его температуры, длины волны света в вакууме и напряженности магнитного поля.

Основными достоинствами данных устройств являются их широкий частотный диапазон (до нескольких ГГц), высокая помехозащищенность всех узлов, так как связь между ними осуществляется световым лучом, возможность передачи информации на большие расстояния.

К недостаткам следует отнести следующее:

1. нижний предел чувствительности при существующих в настоящее время материалах лежит на уровне сотен А/м, что недостаточно для измерения импульсных полей во всем рабочем диапазоне;

2. нелинейная зависимость выходного сигнала измерителя от амплитуды магнитного поля вследствие необходимости применения для выделения полезного сигнала из светового луча поляризационных призм, световой поток на выходе которых изменяется по закону Малюса;

3. необходимость ряда сложных и громоздких вспомогательных устройств, а именно: источника монохроматического света (лазера), фотоприемника (ФЭУ) и т.д.;

4. зависимость константы Верде от температуры.

Однако, невзирая на эти недостатки, данные устройства ввиду их широкополосности и помехозащищенности находят применение для измерения импульсных полей в лабораторных условиях на установках, размещенных в закрытых помещениях.

Метод магнитосопротивления. В основе метода лежит эффект Гаусса – изменение электропроводности вещества под действием магнитного поля. Эффект объясняется искривлением траектории движения зарядов.

$$\frac{\Delta R}{R} = A\eta^2 B^2, \quad (6)$$

где $\frac{\Delta R}{R}$ – относительное изменение сопротивления преобразователя; B – индукция магнитного поля; η – подвижность носителей заряда; A – коэффи-

циент, зависящий от размера, формы, материала датчика.

Устройство преобразователя аналогично преобразователю Холла, но напряжение снимается с токовых электродов. Такие преобразователи используются для измерения постоянных или медленно изменяющихся синусоидальных полей.

При измерении ИМП необходимо, чтобы время фронта импульса магнитного поля был намного больше времени диффузии магнитного поля в преобразователь и времени релаксации для рассеяния носителей заряда.

Нагрев, вызванный протеканием основного тока должен быть мал во избежание больших погрешностей. Чаще всего преобразователь включается в одно из плеч моста, который питается источником постоянного напряжения.

При измерении импульсных магнитных полей необходимо измерить сопротивление преобразователя, а затем осуществить пересчет к импульсу магнитного поля так как связь $B = f(R)$ нелинейна.

Достоинства метода: простота метода малая инерционность.

Недостатки: низкая чувствительность, малый диапазон измерений $B = 0,5 \dots 3$ Тл, значительная зависимость от температуры, малая помехозащищенность, нелинейная зависимость $B = f(R)$.

Метод феррозонда. Принцип действия феррозондовых измерителей основан на зависимости магнитной проницаемости сердечника с обмотками, питаемые переменным током, от напряженности измеряемого магнитного поля. Ток в обмотках создает напряженность магнитного поля равное по величине и противоположное по направлению. Индукция в сердечнике будет функционально зависеть от разности:

$$B_1 = f(H_u - H); \quad (7)$$

$$B_2 = f(H_u + H), \quad (8)$$

где B_1 – индукция магнитного поля в первом сердечнике; B_2 – индукция магнитного поля во втором сердечнике; H_u – измеряемая напряженность магнитного поля; H – напряженность магнитного поля, создаваемая током в обмотках.

ЭДС, наводимая в измерительной обмотке пропорционально:

$$e = -sw \frac{d(B_1 + B_2)}{dt}, \quad (9)$$

где s – площадь сердечников; w – количество витков в измерительной обмотке.

Для измерения синусоидального поля:

$$e(t) = k \cdot \sin 2\Omega t \cdot (H_{um} \sin \omega t). \quad (10)$$

Достоинства метода:

- возможность измерения слабых магнитных полей;
- высокая надежность;
- высокая помехоустойчивость преобразователя.

Недостатки:

- низкая точность;
- малый диапазон измерений (H_u не более 10^4 А/м);
- ограничение по частоте.

Метод электромагнитной индукции. Данный метод основан на появлении ЭДС в катушке, вносимой в магнитное поле. Эта ЭДС, пропорциональная производной от измеряемого магнитного поля.

Метод широко применяется при научных исследованиях ввиду своей простоты и надежности, широкого амплитудно-временного диапазона и приемлемой точности. Существует большое количество конструкций датчиков, дискретно перекрывающих диапазон частот от единиц Гц до десятков МГц и диапазон амплитуд от долей мА/м до сотен тысяч А/м.

Существенными достоинствами данного метода являются малый уровень собственных шумов, слабая зависимость метрологических характеристик от климатических факторов, небольшие геометрические размеры. Однако слабая помехозащищенность конструкций служит серьезным препятствием на пути широкого внедрения данных датчиков в практику измерения ИМП.

Индукционный преобразователь (ИП) представляет собой магнитную (рамочную) антенну, помещенную в измеряемое магнитное поле. ЭДС, наводимая в ИП, в соответствии с законом электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного поля:

$$e_d = -\mu_0 \mu_r s w \frac{dH}{dt} \cos \varphi, \quad (11)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость материала сердечника ИП; s – площадь рамки (m^2); w – количество витков рамки; φ – угол между направлением вектора H и нормалью к рамке.

Таким образом, максимальная ЭДС наводится в ИП, если $\varphi = 0$. На рис. 1 приведена схема замещения ИП.

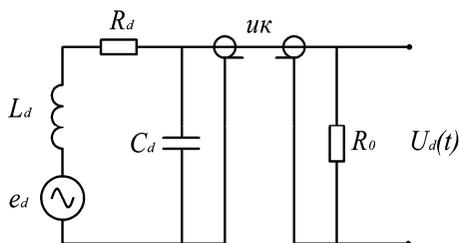


Рисунок 1 – Схема замещения ИП

Дифференциальное уравнение, связывающее эдс e_d и напряжение на выходе ИП U_d , имеет вид:

$$e_d = L_d C_d \frac{d^2 U_d}{dt^2} + \left(\frac{L_d}{R_0} + R_d C_d \right) \frac{dU_d}{dt} + \left(1 + \frac{R_d}{R_0} \right) U_d, \quad (12)$$

где e_d – ЭДС, наводимая в ИП; L_d – индуктивность ИП; C_d – суммарная паразитная емкость ИП; R_d – сопротивление ИП; R_0 – входное сопротивление интегратора; U_d – выходное напряжение ИП.

Передаточная характеристика представляет собой напряжение на выходе ИП U_0 при подаче на его вход единичного скачка напряжения $1(t)$. Для ИП, схема замещения которого приведена на рис. 1 :

$$U_0 = \frac{R_0}{R_0 + R_d} \left[1 + \frac{1}{P_1 - P_2} (P_2 e^{-P_1 t} - P_1 e^{-P_2 t}) \right], \quad (13)$$

где P_1 и P_2 – корни характеристического уравнения:

$$p^2 + ap + b = 0; \quad (14)$$

$$a = \frac{1}{C_d R_0} + \frac{R_d}{L_d}; \quad (15)$$

$$b = \frac{R_0 + R_d}{C_d L_d R_0}; \quad (16)$$

$$P_{1,2} = -\frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}. \quad (17)$$

При $a^2/4 > b$ – корни характеристического уравнения будут действительными, а передаточная характеристика – аperiodической или пересогласованной, а при $a^2/4 = b$ передаточная характеристика будет критически согласованной. Уравнение передаточной характеристики ИП для этого случая имеет вид:

$$U_0 = \frac{R_0}{R_0 + R_d} \left[1 - \left(1 + \frac{at}{2} \right) e^{-\frac{at}{2}} \right]. \quad (18)$$

Минимальными по степени деформации измеряемого импульса будут ИП с критически согласованной ПХ (при $a^2/4 < b$ и $p_1 = p_2$).

Параметр $a = 2/\sqrt{L_n C_n}$ (при $R_0 \gg R_n$) характеризует время нарастания ПХ, определяемое по формуле:

$$T_n^{ПХ} = 3,35 \sqrt{L_n C_n}. \quad (19)$$

Для получения на выходе ИНМП сигнала, пропорционального H_0 , необходимо сигнал с ИП проинтегрировать. Существуют два способа интегрирования:

- с использованием элементов ИП (RL-интегрирование);
- с внешним RC-интегратором.

В первом случае необходимо выполнить условия:

$$L \frac{di_n}{dt} \gg (R_0 + R_n)i_n; C_n \rightarrow 0. \quad (20)$$

При этом:

$$e_n = K_n \frac{dH}{dt} = L_n \frac{di}{dt}, \quad (21)$$

то есть $i_n \approx H_0$, а, следовательно, $U_0 = i_n R_0 \approx H_0$. Такого рода ИП называют самоинтегрирующимися.

Условия малоискаженного измерения формы импульсов магнитного поля вида $H = H_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ можно выразить как:

$$R_0 C_0 \ll \frac{1}{\beta}; \quad T_H^c \ll \frac{1}{\alpha}. \quad (22)$$

У несомоинтегрирующих ИП на выход включают RC-цепочку, тогда при выполнении условий:

$$U_{R_n} \gg U_{C_n}; \quad U_{R_n} \gg U_{L_n}; \quad R_n \gg R_n; \quad C_n \rightarrow 0; \quad R_0 \rightarrow \infty; \quad (23)$$

$$i_n = \frac{e_n}{R_n} = \frac{K_n}{R_n} \frac{dH}{dt}; \quad (24)$$

$$U_{C_n} = \frac{1}{C_n} \int i_n dt = \frac{K_n}{R_n C_n}, \quad (25)$$

где $R_n C_n = T_n^H$ – постоянная интегрирования RC-интегратора.

Коэффициент преобразования ИП обоих видов определяется по формуле

$$K_n^H = \frac{U_d}{H_0} = \frac{\mu_0 \mu_r S w \cdot \cos \varphi}{T_n}. \quad (26)$$

Для определения области применения ИНМП с ИП обоих видов необходимо их сравнить по чувствительности и возможности удовлетворения условий (22).

Исходя из приведенных предпосылок можно сделать вывод, что для измерения магнитных полей наносекундного диапазона предпочтительны ИНМП с самоинтегрирующимися ИП, а для измерения магнитных полей микро- и миллисекундного диапазона – ИНМП с RC-интегратором;

Как показывает анализ схемы замещения, параметры несомоинтегрирующих СИ можно оптимизировать. Ниже приведены формулы для расчета оптимального числа витков ИП и диаметра:

$$W_{\text{опт}} = 0,3573 \sqrt{\frac{H_m \cdot T_\phi^4}{U_0 \cdot T_u \cdot C_d^2}}; \quad (27)$$

$$d_{\text{опт}} = 1,67 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{U_0^2 \cdot T_{\text{и}}^2 \cdot C_{\text{д}}}{T_{\text{ф}}^2 \cdot H_{\text{м}}^2}}, \quad (28)$$

где $T_{\text{ф}}$ и $T_{\text{с}}$ – длительности фронта и спада измеряемых импульсов; d – диаметр ИП; U_0 – напряжение, которое снимается с ИП; $C_{\text{д}}$ – паразитная емкость ИП, состоящая из емкостей ИП и кабельной линии передачи информации.

Выводы. Рассмотрены методы измерения ИМП. Показаны их достоинства и недостатки.

Список литературы: 1. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Кнопфель Г. – М. : Мир, 1972. – 392 с. 2. Панин В.В. Измерение импульсных магнитных и электрических полей / Панин В.В., Степанов Б.М. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.

Bibliography (transliterated): 1. Knopfel' G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja. L Knopfel' G. Moscow: Mir, 1972. 392 s. Print. 2. Panin V.V. Izmerenie impul'snyh magnitnyh i jelektricheskikh polej. Panin V.V., Stepanov B.M. Moscow: Jenergoatomizdat, 1987. 120 s. Print.

Поступила (received) 02.09.2014

УДК 621.391:681.3:396(075)

В.Б. ШВАЙЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУУ «КПИ»;
О. ШАРАДГА, аспирант, НТУУ «КПИ»;
Д. В. ТИТКОВ, ассистент, НТУУ «КПИ»

КОНЦЕПЦИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Предлагаются методы повышения эффективности помехоподавляющих фильтров, изменяющих избирательность на основе мониторинга помеховой обстановки в кондуктивных цепях. Проведена оценка экономической эффективности и технической реализации на современной элементной базе. Сделаны выводы о возможности удаленного управления фильтрами на основе облачных распределенных вычислений и прогнозирования изменения электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: интеллектуальные помехоподавляющие фильтры, концепция, мониторинг, облачные вычисления, обработка

Введение. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) в конкретной электромагнитной обстановке (ЭМО) по кондуктивным цепям тре-

© В.Б. Швайченко, О. Шарадга, Д. В. Титков, 2014

бует применения конструктивных, схемотехнических и организационных средств [1,2]. Наиболее распространенными техническими средствами, которые позволяют уменьшить уровень кондуктивных ИРП являются помехоподавляющие фильтры (ППФ), номенклатура которых охватывает более тысячи типоминалов, выпускаемых почти сотней компаний во всем мире [3].

Актуальность. Паразитные параметры элементов ППФ накладывают ограничения на вносимое затухание вблизи собственных резонансных частот. Известны интеллектуальные сетевые ППФ, управление которыми осуществляются с использованием микропроцессоров (МП), в которых предусмотрена перестройка основных/паразитных параметров элементов, что позволяет перемещать собственные резонансные частоты в защищаемом диапазоне частот [4]. Однако существует проблема как дистанционной оценки ЭМО, так и удаленного управления МП. Поскольку количество электронных устройств, подключенных к сети электропитания и генерирующих помехи, все время возрастает, а паразитные параметры существенно влияют на эффективность эффективности ППФ, то управление параметрами, определяющими частоты резонанса и добротность звеньев фильтра, является актуальным.

Постановка задачи. Известна структура фильтра, позволяющая адаптировать его характеристики в соответствии с помеховой обстановкой [5]. Возможны несколько процедур, которые позволяют повысить эффективность фильтра. Некоторые из них требуют значительных вычислительных ресурсов и реализация такого устройства приведет к существенному подорожанию изделия [6].

Особенности концепции. Предложена концепция интеллектуального помехоподавляющего фильтра с удаленной обработкой данных как элемента информационной системы. Целесообразно дополнить известную структуру беспроводным модулем (передатчиком) для удаленного контроля работы ППФ. Структура такого интеллектуального фильтра представлена на рис. 1.

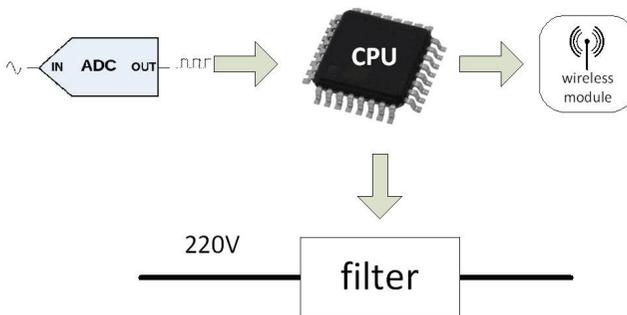


Рисунок 1 – Структурная схема интеллектуального фильтра

Для современных информационных систем характерна возможность гибкого масштабирования. Удаленное управление и мониторинг может обеспечить структура ППФ по рис.2.

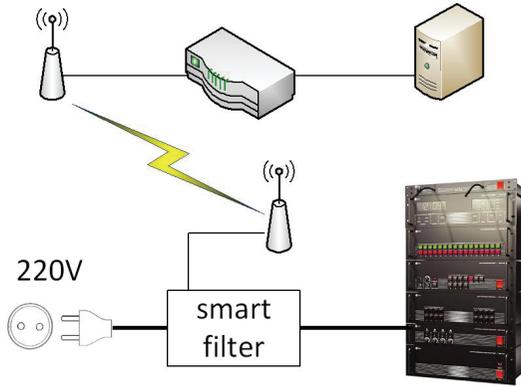


Рисунок 2 – Структурная схема интеллектуального помехоподавляющего фильтра с удаленной обработкой

Оценка возможности и доступности реализации цифровой части интеллектуального фильтра. Современные технологии распределенных облачных вычислений [7] позволяют, на основе технико-экономического анализа [8], обеспечить обработку в реальном времени процессов с верхними граничными частотами, соответствующими требованиям и нормам [9] на параметры ЭМС по кондуктивным путям.

Для прямой (без сжатия) передачи данных через беспроводные сети нужен поток, который можно рассчитать по формулам:

$$\text{Vbrate} = \text{разрядность АЦП} * \text{Частота Дискретизации} = 24 * 48000 = 1,152 * 10^6$$

Практически все современные микроконтроллеры способны обработать нужный поток данных. Ниже, для примера, приведены характеристики одного из самых распространенных микроконтроллеров.

Название: C8051F350

Ядро: MCS-51

Быстродействие: 50 MIPS

Тактовая частота: 50 МГц

Память: Flash 8КБайт

Стоимость: \$2.25

Перечень нескольких АЦП, предлагаемых на современном рынке таких устройств, представлены в табл. 1

Для обеспечения беспроводного удаленного доступа возможно применение соответствующих микросхем приемо-передатчиков, инкапсулированных в корпусе ППФ. Перечень и основные параметры бюджетных модулей

представлен в табл. 2.

Кроме того, в настоящее время на рынке предлагают решения, объединяющие в одной микросхеме как модуль предварительной обработки, так и высокоскоростной приемо-передатчик.

Таблица 1 – АЦП, доступные на современном рынке

Название	Разрядность	Частота выборок (SPS)	Стоимость за 1000 штук
AD7176-2	24	250 KSPS	\$10.25
AD7764	24	312 MSPS	\$10.10
AD7765	24	165 KSPS	\$8.56
AD7766	24	128 KSPS	\$6.02
AD7767	24	128 KSPS	\$8.60
AD7762	24	625 KSPS	\$15.10

Таблица 2 – Беспроводные модули, доступные на современном рынке

Название	Протокол	Пропускная способность	Расстояние	Стоимость за 1000 штук
NRF24LE1	свой	до 2 Mps	до 500 м	\$3
HC-05	Bluetooth	до 1.5 Mps	до 500 м	\$4
LinkSprite Cuhead WiFi module	WiFi	до 2 Mps	До 1.5км	\$45
wizfi210	WiFi	до 11 Mps	До 2 км	\$53

В зависимости от количества конечных устройств (фильтров), расположения в пространстве и вычислительных потребностей такую систему можно легко и быстро масштабировать к необходимой структуре. Система с несколькими ППФ и пространственным разнесением представлена на рис. 3.

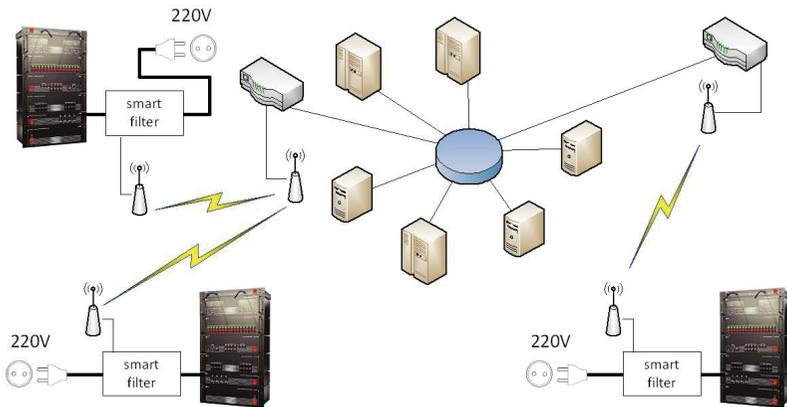


Рисунок 3 – Структурная схема комплексной системы интеллектуальных ППФ с удаленной распределенной обработкой

Выводы. Быстрая адаптация параметров фильтра к условиям электромагнитной обстановки позволит существенно, в десятки раз, уменьшить уровень помех на критических частотах, обеспечив тем самым электромагнитную совместимость.

Предложена концепция нового ППФ с беспроводным интерфейсом и распределенной обработкой данных реального времени, который может быть реализован на основе современной элементной базы.

Список литературы: 1. Векслер Г.С. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Векслер Г.С. и др. – К.: Техніка, 1990. – 167 с. 2. Кечиев Л.Н. ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникации / Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М.: Изд. дом «Технологии», 2005. – 320 с. 3. Смирнов И. Г. Телекоммуникационные системы: электромагнитные помехи и электромагнитная совместимость / И. Г. Смирнов // Компьютерные сети: Сети и системы связи. – 1997. – № 4. – С. 23-27. 4. Пілінський В.В. Особливості мікропроцесорного керування параметрами дроселя протизавадогового фільтра для керування характеристиками загасання в смузі частот 3...5 декад / В.В.Пілінський, С.М. Веретюк, А.О. Довженко, В.Б. Швайченко // Електроніка і зв'язь. Тем.вип. «Електроніка і нанотехнології». – 2011. – № 4. – С. 182-187. 5. Пілінський В.В. Програмно-технічна система забезпечення захисту інформаційних ресурсів по колам електроживлення / В.В.Пілінський, В.Б. Швайченко, О.О. Довженко, В.М. Бакіко // Інформаційні технології в освіті. – 2010. – Вип. 7. – С. 170-174. 6. C. Gazda et al. A wideband common-mode suppression filter for bend discontinuities in differential signaling using tightly coupled microstrips // IEEE Trans. Adv. Pack. – Nov. 2010. – Vol. 33, no. 4. – PP. 969–978. 7. Лунтовський А.О. Розподілені сервіси телекомунікаційних мереж та повсюдний комп'ютинг і Cloud-технології / А.О. Лунтовський, М.М. Клімаш, А.І. Семенко. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2013. – 368 с. 8. Згуровський М. З. Принятие решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами / М. З.Згуровський, А. А. Павлов. – К.: Наукова думка, 2010. – 575 с. 9. CISPR 22 Edition 6.0 2008-09 IEC STANDARDS+ Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement – Режим доступа : http://www.webstore.iec.ch/preview/info_cispr22{ed6.0.RL}b.pdf. – Дата обращения: 29 сентября 2014.

Bibliography (transliterated): 1. Veksler, G.S. et al. Podavlenije elektromagnitnyh pomeh v cepjah elektropitanija Kiev: Technika, 1990. Print. 2. Kechiev, L. N. , and Stepanov, P.V. *EMS i informacionnaja bezopasnost' v sistemah telekommunikacij* Moscow: Izdatelskij dom Tehnologiji, 2005 . Print. 3. Smirnov, I. G. "Telekommunikacionnye sistemy: elektromagnitnye pomehi i elektromagnitnaja sovmestimost'." Komp'juternye seti: Seti i sistemy svjazi. No. 4. 1997. 23-27. Print. 4. Pilinskij, V. V., Veretjuk, S.M., Dovgenko, A.O. and Shvaichenko, V.B. "Osoblivosti mikroprocesornogo keruvannja parametrami drosselja protyzavadovogo fil'tra dlja keruvannja karakteristikami zagassannja v smuzi chastot 3-5 dekad." Elektronika i svjaz'. No. 4. 2011. 182–185. Print. 5. Pilinskij, V. V., Bakiko, V.M., Dovzhenko, O.O. and Shvaichenko, V.B. "Programno-tehnicna sistema zabezpechennja zahystu informacijnyh resursiv po kolam elektrozhlivlennja." Informacijni tehnologiji v osviti. No. 7, 2010. 170–174. Print. 6. C. Gazda et al. «A wideband common-mode suppression filter for bend discontinuities in differential signaling using tightly coupled microstrips.» IEEE Trans. Adv. Pack., vol. 33, no. 4, pp. 969–978, Nov. 2010. Print. 7. Luntovskij, A.O., Klimash, M.M. and Semenko, A.I. . Rozpodiljeni servisy telekommunikacijnyh merereg ta povsjudny kompjutjng i Cloud-tehnologiji. L'viv: NU «L'vivska politehnika», 2013. Print. 8. Zgurovskij, M.Z. and Pavlov, A.A. Prinjatje reshenij v setevyh sistemah s ogranichenymi resursami. Kiev: Nauk.dumka, 2010. Print. 9. CISPR 22 Edition 6.0 2008-09 IEC STANDARDS+ Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement >.. Web. 29 September 2014 < http://www.webstore.iec.ch/preview/info_cispr22{ed6.0.RL}b.pdf >.

Поступила (received) 10.10.2014

РЕФЕРАТИ

УДК 537.529: 620.3

Електрофізичні параметри синтезу вуглецевих наноструктур в процесі електровибуху / В.Ю. Бакларь, Н.И. Кускова, С.А. Хайнацький // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 3-12. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Отримано залежності, що визначають фазові та структурно-фазові перетворення речовини в процесі однорідного нагріву циліндричного провідника потужним імпульсом струму. Розраховано електрофізичні параметри синтезу різноманітних вуглецевих наноструктур, що забезпечують виконання енергетичних і термодинамічних умов структурно-фазових перетворень вуглецю. Проведено експериментальні дослідження електровибухових процесів синтезу вуглецевих наноматеріалів. Побудовано фазові траєкторії вуглецю для різних режимів електровибуху.

Ключові слова: Електричний вибух провідників, вуглецеві наноматеріали, фазові траєкторії вуглецю.

УДК 621.3.022: 621.7.044.7

Вибір та установка захисних високовольтних керамічних резисторів у зарядно-розрядних потужних емнісних накопичувачах енергії / М.І. Баранов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 13-20. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведено результати розрахункової оцінки кількості захисних високовольтних керамічних постійних резисторів у зарядно-розрядних колах потужних емнісних накопичувачів електричної енергії, які використовуються в різних вітчизняних і зарубіжних електротехнологіях. Вказано отримані дані практичної апробації запропонованого підходу по вибору захисних керамічних об'ємних постійних резисторів в даних електричних колах високовольтної імпульсної техніки.

Ключові слова: високовольтний емнісний накопичувач енергії; зарядно-розрядне коло; захисний резистор; розрахункова оцінка числа захисних резисторів.

УДК 621.3.022: 621.7.044.7

Основні показники термомеханічного захисту високовольтних конденсаторів в зарядно-розрядних колах потужних емнісних накопичувачів енергії від аварійних надструмів / М.І. Баранов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 20-27. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведено результати розрахункової оцінки обмежень встановленими в зарядно-розрядних колах потужних емнісних накопичувачів енергії (ЕНЕ) захисними високовольтними керамічними резисторами амплітуд аварійного надструму, тиску і температури в локальній зоні внутрішнього електричного пробую маслаповненого високовольтного імпульсного конденсатора вказаних кіл ЕНЕ і розвитку сильнопоточного плазмового каналу іскрового розряду в його рідкому діелектрику.

Ключові слова: потужний емнісний накопичувач енергії; високовольтний конденсатор; захисний резистор; оцінка обмежень струму, тиску і температури.

УДК 551.594.221

Високовольтний керований сильнопоточний іскровий розрядник з графітовими електродами РВГУ-50 / М.І. Баранов, Г.М. Коліушко, О.С. Недзельський, А.В. Плічко, О.Г. Понуздаєва // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 28-37. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

В статті представлені технічні характеристики і опис конструкції високовольтного іскрового розрядника РВГУ-50. Розрядник призначений для комутації розрядного ланцюга імітатора імпульсного струму блискавки з амплітудою до 220 кА при тривалості імпульсу до 350 мкс. Тривалість фронту імпульсу струму – від одиниць до десятків мкс. Графітові електроди розряд-

ника забезпечують значний ресурс експлуатації Розрядник призначений для комутації розрядної ланцюга імітатора імпульсного струму блискавки з амплітудою до 220 кА при тривалості імпульсу до 350 мкс. Тривалість фронту імпульсу струму - від одиниць до десятків мкс. Графітові електроди розрядника забезпечують значний ресурс експлуатації імітатора при проведенні випробувань технічних засобів на стійкість до впливу прямого удару блискавки з параметрами, відповідними максимальним руйнівним факторам. Розрядник РВГУ-50 пройшов випробування на дочочому імітаторі імпульсного струму блискавки.

Ключові слова: керований розрядник, графітові електроди, імітатор імпульсного струму блискавки.

УДК 621.316.99

Модернізація вимірювального комплексу КДЗ-1У / И.Н. Богатирьев, В.И. Доценко, А.В. Плічко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 37-41. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті розглянута модернізація комплексу КДЗ-1У для діагностики заземлюючих пристроїв, в результаті якої було знижено його енергоспоживання, зменшені масогабаритні показники, підвищена ергономічність і точність визначення параметрів заземлюючих пристроїв. Цього вдалося досягти за рахунок підвищення ККД генератора, заміни трансформаторного блоку живлення на імпульсний, поліпшення вимірювальної частини комплексу, зміни системи управління.

Ключові слова: модернізація, діагностики заземлюючих пристроїв.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Ефективність осадження пилу полем коронного розряду при різних типах живлюючої напруги / Л. З. Богуславский, В. В. Диордийчук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 41-48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто питання ефективності вловлювання пилу з промислових газових викидів шляхом електростатичної фільтрації при живленні одночасному живленні коронного розряду в технологічному об'ємі різними типами постійної, змінної та імпульсної напруги. Встановлено взаємозв'язок між довжиною прольоту часток пилу по зоні фільтрації з ефективністю фільтрації. Експериментально підтверджено квадратична форма залежності ефективності осадження пилу від величини напруги, що живить. Встановлено підвищення ефективності осадження пилу при використанні комбінованого живлення.

Ключові слова: електростатична фільтрація, довжина прольоту частки, швидкість дрейфу, форма напруги живлення.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Імпульсні джерела живлення з адаптивним керуванням для ефективної електрофільтрації різноімпедансних газових викидів / Л. З. Богуславський, Л. М. Мирошниченко, Л. Є. Овчиннікова, С. С. Козирєв // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 49-55. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто питання підвищення ефективності електрофільтрації різноімпедансних газових викидів шляхом використання додаткових імпульсних джерел живлення з адаптивною системою керування. Адаптивна система керування зі зворотними зв'язками забезпечує коригування параметрів імпульсів генераторів відповідно до складу газових викидів, що дає змогу генерувати високовольні імпульси з параметрами, які дозволяють вести ефективну деструкцію усіх вагомих складових в процесі обробки. Це забезпечує найбільш ефективне використання енергії для деструкції кожного виду складових різноімпедансних газових викидів.

Ключові слова: імпульсні джерела живлення, адаптивна система керування, електрофільтрація, різноімпедансні газові викиди.

УДК 519.2

Визначення метрологічних характеристик малогабаритних вимірювальної антени В ТЕМ-камері / Е.М. Васильєва, С.А. Винниченко, С.Г. Бондар // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 56-60. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто можливість використання ТЕМ-камери для калібрування різних типів антен, включаючи вимірювальні. Наведено обмеження, зумовлені конструкцією ТЕМ-камери, і апаратний склад комплексу вимірювань. Визначені напрями робіт для розширення функціональних можливостей комплексу в частині розширення апаратного складу і проведення додаткових теоретичних і експериментальних досліджень.

Ключові слова: ТЕМ-камера, електромагнітне поле, калібрування антен, електромагнітна сумісність.

УДК 621.319.4

Вплив стабілізації та очищення рідкого діелектрика на електричну міцність різних конструкцій плівкового діелектрика для високовольтних імпульсних конденсаторів / В.І. Гулько, О.Я. Дмитрішин, А.П. Малюшевська, С.О. Топоров // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 61-65. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто питання про відмову від очищення та стабілізації рідкого діелектрика для просочення високовольтних імпульсних конденсаторів і вплив цього фактору на електричну міцність робочого діелектрика та ресурс конденсатора. Дослідження по визначенню короткочасної електричної міцності та ресурсу секцій на основі комбінованих плівкових діелектричних структур різної товщини показали, що короткочасна електрична міцність систем з неочищеним просочуючим діелектриком практично не змінюється, а середній очікуваний ресурс зменшується від 2 до 4 раз.

Ключові слова: високовольтний імпульсний конденсатор, рідкий просочувальний діелектрик, електрична міцність, очікуваний ресурс.

УДК 621.371: 621.314.4

Про фізику власної електромагнітної сумісності електроенергетичної системи / О.І. Дорошенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 66-72. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Зважаючи на те, що робочим органом електроенергетичної системи є її електромагнітне поле, яке може існувати лише у її діелектричному середовищі, що оточує струмоведучі частини системи і складається з електромагнітних полів усіх її електроустановок, пропонується у поняття електромагнітної сумісності таких систем вкладати їх спроможність до нормального функціонування за умови нормального навантаження усіх їх електроустановок з визначенням рівня допустимості та необхідності такої сумісності.

Ключові слова: електроенергетична система, електромагнітне поле, електромагнітна сумісність, умови достатності і необхідності електромагнітної сумісності.

УДК 621.762.3 : 544.556.1 : 537.52

Розрядно-імпульсна технологія обробки порошоків / А. Д. Зайченко, О. Н. Сизоненко, Е. М. Шерєгий, Е. В. Ліпнян, А. С. Торпаков, Н. С. Присташ, В. А. Трегуб // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 73-81. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто можливості розрядно-імпульсної технології обробки порошоків різного складу з метою їхнього диспергування, активації, ініціації структурно-фазових перетворень, синтезу порошоків шихти для створення в результаті матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Для досліджуваних порошоків металів, твердих і надтвердих матеріалів встановлено режими обробки, що забезпечують потрібний рівень дисперсно-

сті та необхідний фазовий склад.

Ключові слова: високовольтний електричний розряд, дисперсна система, диспергування, активація, синтез, модифікація поверхні, порошки, карбіди металів, алмази, тверді сплави, карбід кремнію, карбід бора.

УДК 537.8:621.316.98

Аналіз електромагнітної сумісності на нафтоперекачуючих станціях / Ісам М. А. Абдельшафі // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 82-84. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті розглянута проблема забезпечення електромагнітної сумісності на нафтоперекачувальних станціях – об'єктах з жорсткою електромагнітною обстановкою. Відсутність нормативної бази з ЕМС для таких об'єктів призводить до того, що не реалізується системний підхід до захисту від небезпечних електромагнітних впливів. Проведено аналіз джерел і приймачів електромагнітних впливів, можливих ризиків і наслідків через недотримання електромагнітної сумісності.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, нафтоперекачувальна станція.

УДК 621.3.038.613

Система живлення й управління інжектора багатозарядних іонів ЕСУ «СОКІЛ» / С. Г. Карпунь // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 85-90. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

В 2010 р. в ННЦ ХФТІ було розроблено джерело багатозарядних іонів газів (типу Пеннінга з холодними катодами та витягуванням іонів вздовж осі джерела) для електростатичного прискорювача (ЕСП) «СОКОЛ», використання якого розширює аналітичні можливості установки для ядерно-фізичних методів аналізу. Для узгодження роботи джерела багатозарядних іонів з прискорювачем розроблено інжектор і система керування та живлення. В статті представлено опис системи керування та живлення інжектором багатозарядних іонів ЕСП «СОКОЛ», яка складається з таких дистанційно керованих джерел живлення: розрядного (анодного), витягування, фокусування, а також джерел живлення та керування системи напуску робочих газів. Показано, що система живлення та керування відповідає вимогам експлуатації та забезпечує стабільну роботу інжектора.

Ключові слова: інжектор багатозарядних іонів, електростатичний прискорювач, система живлення та керування.

УДК 621.317.3

Методика гармонізації рівня стійкості системи автоматизованого контролю і управління стратегічним об'єктом з рівнями ймовірних електромагнітних завад, що супроводжують блискавку / В.В.Князєв, В.І. Кравченко, В.М. Дронов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 90-98. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті представлена методика гармонізації рівня стійкості системи автоматизованого контролю і управління стратегічним об'єктом з можливими рівнями електромагнітних завад, супроводжуючих блискавичний розряд. Детально розглянутий статистичний метод розрахунку ймовірності влучення блискавки в елементи об'єкту, як початковий етап реалізації методики. Представлений зразок розрахунку ймовірності ураження блискавкою моделі об'єкту, який складається з двох будівель, стержного й тросового блискавоквідводів.

Ключові слова: блискавка, ймовірність, сила струму блискавки, розрядний проміжок, рівень стійкості, стратегічний об'єкт.

УДК 533.9.07

Електрофізична установка з високоградієнтним магнітним полем для дослідження властивостей плазми відбивного розряду / Ю. В. Ковтун, О. М. Озеров, Є. І. Скібенко, В.Б. Юферов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ

«ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 98-109. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті дано опис електрофізичної установки з високоградієнтним магнітним полем для дослідження властивостей плазми відбивного розряду, що істотно відрізняє її від подібних пристроїв, створених і описаних в літературі раніше. Розглянуто основні вузли та системи установки. Розраховано розподіл магнітного поля по осі і радіусу установки. Проведено тепловий розрахунок соленоїдів. Оцінена провідність вакуумної системи. Приведено також опис систем напуску робочого газу контрольованим способом і діагностики плазми із зазначенням вимірювальних каналів.

Ключові слова: відбивний розряд, плазма, магнітне поле, вакуум, соленоїд, напуск газу.

УДК 519.2

Конструкція и термодинамічні показники спробного зразка пристрою блокування оперативних перемикач УБОП / Г.М. Коліушко, О.С Недзельський, О.Г. Понуждаєва, Р.К. Борісов, С.И. Хренов, Д.І. Ковальов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 109-114. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті подана конструкція розробленого спробного зразка пристрою блокування оперативних перемикач УБОП. Пристрій призначений для роботи в системі забезпечення блокувань безпеки комутації апаратів високого напруги енергооб'єктів. Описана робота замкового механізму УБОП з електромагнітним приводом. Подані результати експериментальних досліджень термодинамічних показників роботи УБОП в тривалому режимі включення електромагнітного приводу механізму блокування.

Ключові слова: пристрій блокування оперативних перемикач, замковий механізм, електромагніт, температура нагріву.

УДК 621.317.3

Вимірювання струму кондуктивних радіоперешкод / Ю.С.Немченко, Н.Д. Животов, А.І. Сарасв, Т.Н. Островерх // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 115-121. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0740.

Описано сучасну методику вимірювання емісії струму радіозавод від бортового авіаційного обладнання за допомогою струмоз'ємника ТС-А, створеного та прокаліброваного у Випробувальній лабораторії НДПКІ «Молнія». Ця методика дозволяє швидко і ефективно визначити: чи виконуються у випробовуваному виробі вимоги по емісії струмів радіозавод за усіма чинними в Україні нормативними документами у повному обсязі. Вимоги стандарту ДСТУ ІЕС 61000-4-6: 2007 є обов'язковими до виконання в Україні.

Ключові слова: емісія струму радіозавод, струмоз'ємник, бортове авіаційне обладнання.

УДК 621.317.3

Установка У-КП-80 для випробувань технічних засобів на несприйнятність до кондуктивних перешкод в смузі частот від 150 кГц до 80 МГц / Немченко Ю.С., Князев В.В., Лесной И.П., Сомхів С.Б. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 122-126. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Описано конструкцію і результати атестації установки У-КП-80, призначеної для випробувань технічних засобів на несприйнятливості до кондуктивних завод, наведених радіочастотними електромагнітними полями, у смузі частот від 150 кГц до 80 МГц і вихідною напругою від 1 В до 10 В, згідно з діючим в Україні стандартом ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007. Вимоги стандарту ДСТУ ІЕС 61000-4-6: 2007 є обов'язковими до виконання в Україні.

Ключові слова: випробування, несприйнятливості, кондуктивна завада, установка, атестація.

УДК 621.317.42

Статистичне моделювання орієнтування блискавки на наземні об'єкти з урахуванням можливості виникнення зустрічної іскри / М.М. Резинкіна, О.І. Резинкін, Є.Є. Світличная // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 127-134. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Запропоновано статистичну модель електрофізичних процесів при «виборі» лідерним каналом блискавки об'єктів для удару на землі з урахуванням можливості поширення від них зустрічної іскри. Відповідність даної моделі розглянутим процесам підтверджено шляхом порівняння результатів розрахунку ймовірності місця поразки високовольним розрядом землі та об'єктів, що знаходяться на ній, з відомими експериментальними даними.

Ключові слова: блискавка; лідерний канал, пробій, математичне моделювання.

УДК 621.372

Порівняння можливостей використання Wi-Fi та PLC мереж для керування виробничим обладнанням / А.Ф. Розвадовський, М.В. Родіонова, В.В. Піліський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 135-143. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто можливість використання Wi-Fi та PLC мереж для керування виробничим обладнанням із врахуванням вимог забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС). Виконано розрахунок розподілу електромагнітного поля, створюваного цими мережами. Порівняння технологій Wi-Fi та проводово – безпроводових PLC мереж показало можливість їх використання за умов врахування конкретних умов. Необхідний розподіл електромагнітного поля для PLC мереж досягається при використанні додаткових екрануючих засобів.

Ключові слова: передавання даних, Wi-Fi, PLC, мережа, електромагнітне поле, розподіл, екранування.

УДК 621.317.3

Підвищення чутливості виміру вмісту вологи в трансформаторному маслі діелькометричним методом в резонансному режимі / В. В. Рудаков, А. А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 143-149. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведено опис коаксіальної конструкції вимірювального перетворювача для визначення низьких концентрацій вологовмісту в трансформаторному маслі. Наведені результати визначення вологовмісту для малих концентрацій 0,1-2% за методикою основою на використанні діелькометричного методу в резонансному режимі. Методика дозволяє розраховувати вологовміст за результатами вимірів власних резонансних частот для двох варіантів заповнення вимірювального перетворювача: чистим маслом, досліджуванім маслом, та при відключеному вимірювальному перетворювачу. Наведені похибки резонансних частот, що виміряні частотоміром ЧЗ-34 та вологовмісту досліджуваного масла за відомої наперед концентрації води.

Ключові слова: вологи, трансформаторне масло, емульсія, діелькометричний метод, резонансний метод, вимірювальний перетворювач.

УДК 004.738.2

Синтез СМС-комунікацій через Internet / В. А. Ткаченко, Т. Я. Гричківський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 149-154. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті розглянуті проблеми аналізу і синтезу веб-додатків по розсилці СМС-повідомлень через Internet і питання розробки методів побудови СМС-комунікацій. Обґрунтований вибір протоколів і СМС-шлюзів. На Ruby on Rails розроблені програмний код веб-додатку з Web - та API (RESTful) інтерфейсами, бібліотека взаємодії веб-додатка із СМС-шлюзом і графічний ін-

терфейс клієнтської частини веб-додатка.

Ключові слова: СМС-комунікації, СМС-сервіси, СМС-шлюзи, СМС-повідомлення, СМС-центри, API, WEB- інтерфейс.

УДК 621.317.3

Параметри імпульсної корони на металевих стержнях у сильному електричному полі / О.Ю. Чернухін // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 155-160. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0740.

У роботі представлені результати експериментального дослідження амплітудно-часових параметрів стримерної корони. Випробовування проведені для блискавкоприймачів різної форми поперечного розтину. Визначено функціональні залежності сили струму стримерної корони від величини напруженості електричного поля, в яке поміщається блискавкоприймач. Визначено функціональні залежності сили струму стримерного корони від висоти блискавкоприймача. Встановлені залежності сили струму корони від напруженості електричного поля та висоти блискавкоприймача.

Ключові слова: блискавкоприймач, електричне поле, стример, корона, сила струму.

УДК 519.2

Вимірювання імпульсних магнітних полів / С.П. Шаламов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 161-168. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено огляд методів вимірювання імпульсних магнітних полів (ІМП). Описані принципи дії датчиків ІМП на основі ефектів Холла, Фарадея, магнітоопору а також метод з використанням феррозонда. Роз'яснено особливості застосування датчиків ІМП, наведено їх переваги та недоліки. Також розглянуто метод на основі електромагнітної індукції. Пояснено принцип конструювання датчика. Розглянуті методи вимірювання ІМП. Показані їх переваги та недоліки.

Ключові слова: імпульсне магнітне поле, ефект Холла, ефект Фарадея, ефект магнітоопору, феррозонд, електромагнітна індукція.

УДК 621.391:681.3:396(075)

Концепція удосконалення інтелектуальних мережевих заводських фільтрів / В. Б. Швайченко, О. Шарадга, Д.В. Титков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 168-172. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Пропонуються методи підвищення ефективності проти заводських фільтрів, які змінюють вибірковість за результатами моніторингу заводської обстановки в кондуктивних колах. Проведено оцінювання економічної доцільності і технічної реалізації на сучасній елементній базі. Зроблені висновки щодо можливості віддаленого керування фільтрами на основі хмарних розподілених обчислень та прогнозування електромагнітної обстановки. Запропонована концепція нового ППФ безпроводним інтерфейсом і розподіленою обробкою даних реального часу.

Ключові слова: інтелектуальні протизаводські фільтри, концепція, моніторинг, обробка, хмарні обчислення.

РЕФЕРАТЫ

УДК 537.529: 620.3

Электрофизические параметры синтеза углеродных наноструктур в процессе электровзрыва / В.Ю. Бакларь, Н.И. Кускова, С.А. Хайнацкий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 3-12. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Получены зависимости, определяющие фазовые и структурно-фазовые превращения вещества в процессе однородного нагрева цилиндрического проводника мощным импульсом тока. Рассчитаны электрофизические параметры синтеза разнообразных углеродных наноструктур, обеспечивающие выполнение энергетических и термодинамических условий структурно-фазовых превращений углерода. Проведены экспериментальные исследования электровзрывных процессов синтеза углеродных наноматериалов. Построены фазовые траектории углерода для разных режимов электровзрыва.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, углеродные наноматериалы, фазовые траектории углерода.

УДК 621.3.022: 621.7.044.7

Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 13-20. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты расчетной оценки числа защитных высоковольтных керамических постоянных резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей электрической энергии, используемых в различных отечественных и зарубежных электротехнологиях. Указаны полученные данные практической апробации предлагаемого подхода по выбору защитных керамических объемных постоянных резисторов в рассматриваемых электрических цепях высоковольтной импульсной техники.

Ключевые слова: высоковольтный емкостный накопитель энергии; зарядно-разрядная цепь; защитный резистор; расчетная оценка числа защитных резисторов.

УДК 621.3.022: 621.7.044.7

Основные показатели термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии от аварийных сверхтоков / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 20-27. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты расчетной оценки ограничений установленными в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) защитными высоковольтными керамическими резисторами амплитуд аварийного сверхтока, давления и температуры в локальной зоне внутреннего электрического пробоя маслонеполненного высоковольтного импульсного конденсатора указанных цепей ЕНЭ и развития в его жидком диэлектрике сильноточного плазменного канала искрового разряда.

Ключевые слова: мощный емкостный накопитель энергии; высоковольтный конденсатор; защитный резистор; оценка ограничений тока, давления и температуры.

УДК 551.594.221

Высоковольтный управляемый сильноточный искровой разрядник с графитовыми электродами РВГУ-50 / М.И. Баранов, Г.М. Коллушко, О.С. Недзельский, А.В. Пличко, Е.Г. Понуждаева // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 28-37. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье представлены технические характеристики и описание конструкции высоковольтного искрового разрядника РВГУ-50. Разрядник предназначен для коммутации разрядной цепи имитатора импульсного тока молнии с амплитудой до 220 кА при длительности импульса

до 350 мкс. Длительность фронта импульса тока – от единиц до десятков мкс. Графитовые электроды разрядника обеспечивают значительный ресурс эксплуатации имитатора при проведении испытаний технических средств на стойкость к воздействию прямого удара молнии с параметрами, соответствующими максимальным разрушающим факторам. Разрядник РВГУ-50 прошел испытания на действующем имитаторе импульсного тока молнии.

Ключевые слова: управляемый разрядник, графитовые электроды, имитатор импульсного тока молнии.

УДК 621.316.99

Модернизация измерительного комплекса КДЗ-1У / И.Н. Богатырев, В.И. Доценко, А.В. Пличко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 37-41. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье рассмотрена модернизация комплекса КДЗ-1У для диагностики заземляющих устройств, в результате которой было снижено его энергопотребление, уменьшены массогабаритные показатели, повышена эргономичность и точность определения параметров заземляющих устройств. Этого удалось достичь за счет повышения КПД генератора, замены трансформаторного блока питания на импульсный, улучшения измерительной части комплекса, изменения системы управления.

Ключевые слова: модернизация, диагностики заземляющих устройств.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Эффективность осаждения пыли полем коронного разряда при различных типах питающего напряжения / Л. З. Богуславский, В. В. Диордийчук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 41-48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрены вопросы эффективности улавливания пыли из промышленных газовых выбросов путем электростатической фильтрации, при одновременном питании коронного разряда в технологическом объеме различными типами постоянного, переменного и импульсного напряжения. Установлена взаимосвязь между длиной пролета частиц пыли по зоне фильтрации и эффективностью фильтрации. Экспериментально подтверждена квадратичная форма зависимости эффективности осаждения от величины питающего напряжения. Установлено повышение эффективности осаждения пыли при использовании комбинированного питания.

Ключевые слова: электростатическая фильтрация, длина пролета частиц, скорость дрейфа, форма питающего напряжения

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Импульсные источники питания с адаптивным управлением для эффективной электрофильтрации разноимпедансных газовых выбросов / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, Л. Е. Овчинникова, С. С. Козырев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 49-55. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрены вопросы повышения эффективности электрофильтрации разноимпедансных газовых выбросов путем использования дополнительных импульсных источников питания с адаптивной системой управления. Адаптивная система управления с обратными связями, обеспечивает корректировку параметров импульсов генераторов в соответствии с текущим составом газовых выбросов, что дает возможность генерировать высоковольтные импульсы с параметрами, позволяющими вести эффективную деструкцию всех весомых составляющих на протяжении всего процесса обработки. Это способствует наиболее эффективному использованию энергии для деструкции каждого вида составляющих разноимпедансных газовых выбросов.

Ключевые слова: импульсные источники питания, адаптивная система управления, электрофильтрация, разноимпедансные газовые выбросы.

Определение метрологических характеристик малогабаритных измерительных антенн в ТЕМ-камере / Е.М. Васильева, С.А. Винниченко, С.Г. Бондарь // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 56-60. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрена возможность использования ТЕМ-камеры для калибровки различных типов антенн, включая измерительные. Приведены ограничения, обусловленные конструкцией ТЕМ-камеры, и аппаратный состав комплекса измерений. Определены направления работ для расширения функциональных возможностей комплекса в части расширения аппаратного состава и проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: ТЕМ-камера, электромагнитное поле, калибровка антенн, электромагнитная совместимость.

Влияние стабилизации и очистки жидкого диэлектрика на электрическую прочность различных конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов / В.И. Гулько, А.Я. Дмитришин, А.П. Малюшевская, С.О. Топоров // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 61-65. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрен вопрос об отказе от очистки и стабилизации жидкого диэлектрика для пропитки высоковольтных импульсных конденсаторов и влияния этого фактора на электрическую прочность рабочего диэлектрика и ресурс конденсатора. Исследования по определению кратковременной электрической прочности и ресурса секций на основе комбинированных пленочных диэлектрических структур различной толщины показали, что кратковременная электрическая прочность систем с неочищенным пропитывающим диэлектриком практически не изменяется, а средний ожидаемый ресурс уменьшается от 2 до 4 раз.

Ключевые слова: высоковольтный импульсный конденсатор, жидкий пропитывающий диэлектрик, электрическая прочность, ожидаемый ресурс.

О физике собственной электромагнитной совместимости электроэнергетической системы / А.И. Дорошенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 66-72. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

В связи с тем, что рабочим органом электроэнергетической системы есть ее электромагнитное поле, которое может существовать лишь в ее диэлектрической среде, окружающей токоведущие части системы и состоящее из электромагнитных полей всех ее электроустановок, предлагается в понятие электромагнитной совместимости таких систем вкладывать их способность к нормальному функционированию при условии нормальной наружки всех их электроустановок с определением уровня допустимости и необходимости такой совместимости.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, электромагнитное поле, электромагнитная совместимость, условия допустимости и необходимости электромагнитной совместимости.

Разрядно-импульсная технология обработки порошков / А. Д. Зайченко, О. Н. Сизоненко, Е. М. Шерегий, Е. В. Липня, А. С. Торпаков, Н. С. Присташ, В. А. Трегуб // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 73-81. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрены возможности разрядно-импульсной технологии обработки порошков разного состава с целью их диспергирования, активации, инициации структурно-фазовых превращений, синтеза порошковой шихты для создания материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Для исследуемых порошков металлов, твердых и сверхтвердых материалов уста-

новлены режимы обработки, обеспечивающие требуемый уровень дисперсности и необходимый фазовый состав.

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд, дисперсная система, диспергирование, активация, синтез, модификация поверхности, порошки, карбиды металлов, алмазы, твердые сплавы, карбид кремния, карбид бора.

УДК 537.8:621.316.98

Анализ электромагнитной совместимости на нефтеперекачивающих станциях / Исам М. А. Абдельшафи // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 82-84. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье рассмотрена проблема обеспечения электромагнитной совместимости на нефтеперекачивающих станциях – объектах с жесткой электромагнитной обстановкой. Отсутствие нормативной базы по ЭМС для таких объектов приводит к тому, что не реализуется системный подход к защите от опасных электромагнитных воздействий. Проведен анализ источников и приемников электромагнитных воздействий, возможных рисков и последствий из-за несоблюдения электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, нефтеперекачивающая станция,.

УДК 621.3.038.613

Система питания и управления инжектора многозарядных ионов ЭСУ «СОКОЛ» / С. Г. Карпусь // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 85-90. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

В 2010 г. в ННЦ «ХФТИ» был разработан источник многозарядных ионов газов (типа Пеннинга с холодными катодами и продольным извлечением ионов) для электростатического ускорителя «СОКОЛ», использование которого расширяет аналитические возможности установки для ядерно-физических методов анализа. Для согласования работы источника многозарядных ионов с ускорителем разработаны инжектор и система питания и управления. В статье представлено описание системы питания и управления инжектором многозарядных ионов ЭСУ «СОКОЛ», которая состоит из таких дистанционно регулируемых источников питания напряжений: разрядного (анодного), вытягивающего, фокусирующего, а также источников питания и управления системы напуска рабочих газов. Показано, что система питания и управления удовлетворяет предъявленным требованиям эксплуатации и обеспечивает стабильную работу инжектора многозарядных ионов газов.

Ключевые слова: инжектор многозарядных ионов, электростатический ускоритель, система питания и управления.

УДК 621.317.3

Методика гармонизации уровня устойчивости системы автоматизированного контроля и управления стратегическим объектом с уровнями вероятных электромагнитных помех сопровождающих молниевый разряд / В.В.Князев, В.И. Кравченко, В.Н. Дронов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 90-98. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье представлена методика гармонизации уровня устойчивости системы автоматизированного контроля и управления стратегическим объектом с возможными уровнями электромагнитных помех, сопровождающих молниевый разряд. Подробно рассмотрен статистический метод расчета вероятности попадания молнии в элементы объекта, как начальный этап реализации методики. Представлен пример расчета вероятности поражения молнией модели объекта, состоящего из двух зданий, стержневого и тросового молниеотводов.

Ключевые слова: молния, вероятность, сила тока молнии, разрядный промежуток, уровень устойчивости, стратегический объект.

Электрофизическая установка с высокоградиентным магнитным полем для исследования свойств плазмы отражательного разряда / Ю. В. Ковтун, А. Н. Озеров, Е. И. Скибенко, В.Б. Юферов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 98-109. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье дано описание электрофизической установки с высокоградиентным магнитным полем для исследования свойств плазмы отражательного разряда, что существенно отличает ее от подобных устройств, созданных и описанных в литературе ранее. Рассмотрены основные узлы и системы установки. Рассчитано распределение магнитного поля по оси и радиусу установки. Проведен тепловой расчет соленоидов. Оценена проводимость вакуумной системы. Приведено также описание систем напуска рабочего газа контролируемым способом и диагностики плазмы с указанием измерительных каналов.

Ключевые слова: отражательный разряд, плазма, магнитное поле, вакуум, соленоид, напуск газа.

Конструкция и термодинамические показатели опытного образца устройства блокировки оперативных переключений УБОП / Г.М. Колишко, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждаева, Р.К. Борисов, С.И. Хренов, Д.И. Ковалев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 109-114. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье представлена конструкция разработанного опытного образца устройства блокировки оперативных переключений УБОП. Устройство предназначено для работы в системе обеспечения блокировок безопасности коммутирующих аппаратов высокого напряжения энергообъектов. Описана работа механизма УБОП с электромагнитным приводом. Представлены результаты экспериментальных исследований термодинамических показателей работы УБОП в длительном режиме включения электромагнитного привода механизма блокировки.

Ключевые слова: устройство блокировки оперативных переключений, замковый механизм, электромагнит, температура нагрева.

Измерение тока кондуктивных радиопомех / Ю.С. Немченко, Н.Д. Животов, А.И. Сараяв, Т.Н. Островерх // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 115-121. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0740.

Описана современная методика измерения эмиссии тока радиопомех от бортового авиационного оборудования с помощью токосъемника ТС-А, созданного и прокалиброванного в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния». Эта методика позволяет быстро и эффективно определить: выполняются ли в испытываемом изделии требования по эмиссии токов радиопомех по всем действующим в Украине нормативным документам в полном объеме. Требования стандарта ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007 являются обязательными к выполнению в Украине.

Ключевые слова: эмиссия тока радиопомех, токосъемник, бортовое авиационное оборудование.

Установка У-КП-80 для испытаний технических средств на невосприимчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц / Немченко Ю.С., Князев В.В., Лесной И.П., Сомхив С.Б. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 122-126. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Описана конструкция и результаты аттестации установки У-КП-80, предназначенной для испытания технических средств на невосприимчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями, в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц и выходным напряжением от 1 В до 10 В в соответствии со стандартом ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007. Требования стандарта ДСТУ ІЕС 61000-4-6:2007 являются обязательными

к выполнению в Украине.

Ключевые слова: испытания, невосприимчивость, кондуктивные помехи, установка, аттестация.

УДК 621.317.42

Статистическое моделирование ориентировки молнии на наземные объекты с учетом возможности возникновения встречной искры / М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, Е.Е. Светличная // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 127-134. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Предложена статистическая модель электрофизических процессов при «выборе» лидерным каналом молнии объектов для удара на земле с учетом возможности распространения от них встречной искры. Соответствие данной модели рассматриваемым процессам подтверждено путем сравнения результатов расчета вероятности места поражения высоковольтным разрядом земли и находящихся на ней объектов с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: молния; лидерный канал, пробой, математическое моделирование.

УДК 621.372

Сравнение возможностей использования Wi-Fi и PLC сетей для управления производственным оборудованием / А.Ф. Розадовский, М.В. Родионова, В.В. Пилинский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 135-143. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрены возможности использования Wi-Fi и PLC сетей для управления производственным оборудованием с учетом требований обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) Выполнен расчет распределения электромагнитного поля, создаваемого этими сетями. Сравнение технологий Wi-Fi и проводно-беспроводных PLC сетей показало, что их можно использовать, исходя из конкретных условий. Требуемое распределение электромагнитного поля для PLC сетей достигается при использовании дополнительных экранирующих средств.

Ключевые слова: передача данных, Wi-Fi, PLC, сеть, электромагнитное поле, распределение, экранирование.

УДК 621.317.3

Повышение чувствительности измерений содержания влаги в трансформаторном масле диэлькометрическим методом в резонансном режиме / В. В. Рудаков, А. А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 143-149. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведено описание коаксиальной конструкции измерительного преобразователя для определения низких концентраций влагосодержания в трансформаторном масле. Представлены результаты определения влагосодержания при малых концентрациях 0,1%- 2% по методике, основанной на использовании диэлькометрического метода в резонансном режиме. Методика позволяет рассчитывать влагосодержание по результатам измерения собственных резонансных частот для двух вариантов заполнения измерительного преобразователя: чистым маслом, испытываемым маслом и при отключенном измерительном преобразователе. Приведены погрешности измеренных частотомером ЧЗ-34 резонансных частот и влагосодержания испытываемого масла с известной заранее концентрацией воды.

Ключевые слова: влага, трансформаторное масло, эмульсия, диэлькометрический метод, резонансный метод, измерительный преобразователь.

УДК 004.738.2

Синтез СМС-коммуникаций через Internet / В. А. Ткаченко, Т. Я. Гричковский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 149-154. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье рассмотрены проблемы анализа и синтеза веб-приложений по рассылке

СМС-сообщений через Интернет и вопросы разработки методов построения СМС-коммуникаций. Обоснован выбор протоколов и СМС-шлюзов. На Ruby on Rails разработаны программный код веб-приложения с Web- и API (RESTful) интерфейсами, библиотека взаимодействия веб-приложения с СМС-шлюзом и графический интерфейс клиентской части веб-приложения.

Ключевые слова: СМС-коммуникации, СМС-сервисы, СМС-шлюзы, СМС-сообщения, СМС-центры, API, WEB-интерфейс.

УДК 621.317.3

Параметры импульсной короны на металлических стержнях в сильном электрическом поле / А.Ю. Чернухин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 155-160. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0740.

В работе представлены результаты экспериментального исследования амплитудно-временных параметров стримерной короны. Испытания проведены для молниеприемников различной формы поперечного сечения. Определены функциональные зависимости силы тока стримерной короны от величины напряженности электрического поля, в которое молниеприемник помещается. Определены функциональные зависимости силы тока стримерной короны от высоты молниеприемника. Установлены зависимости силы тока короны от напряженности электрического поля и высоты молниеприемника.

Ключевые слова: молниеприемник, электрическое поле, стример, корона, сила тока.

УДК 519.2

Измерение импульсных магнитных полей / С.П. Шаламов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 161-168. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведен обзор методов измерения импульсных магнитных полей (ИМП). Описаны принципы действия датчиков ИМП на основе эффектов Холла, Фарадея, магнитосопротивления а также метод с использованием феррозонда Разъяснены особенности применения датчиков ИМП, приведены их преимущества и недостатки. Также рассмотрен метод на основе электромагнитной индукции. Разъяснен принцип конструирования датчика.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, эффект Холла, эффект Фарадея, эффект магнитосопротивления, феррозонд, электромагнитная индукция.

УДК 621.391:681.3:396(075)

Концепция совершенствования интеллектуальных сетевых помехоподавляющих фильтров / В. Б. Швайченко, О. Шарадга, Д.В. Титков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 168-172. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Предлагаются методы повышения эффективности помехоподавляющих фильтров, изменяющих избирательность на основе мониторинга помеховой обстановки в кондуктивных цепях. Проведена оценка экономической эффективности и технической реализации на современной элементной базе. Сделаны выводы о возможности удаленного управления фильтрами на основе облачных распределенных вычислений и прогнозирования изменения электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: интеллектуальные помехоподавляющие фильтры, концепция, мониторинг, облачные вычисления, обработка.

ABSTRACTS

Electrophysical parameters of the synthesis of carbon nanostructures in the process of electric explosion / V.Yu. Baklar, N.I. Kuskova, S.A. Khaynatskiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 3-12. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0740.

Synthesis of carbon nanostructures in the process of electric explosion of graphite conductor was considered. Dependences of electro-physical parameters of circle and conductor were theoretically concluded which determines evolution of structurally-phase transformations of carbon under pulse current. The regimes of electro-explosive synthesis were experimentally researched in process of which different carbon allotropic forms appears. The power and thermodynamics conditions of carbon nanomaterials synthesis were defined and the effective regimes of synthesis are established. The established regularities allow controlling of the processes of graphite conductor's electro-explosion at purposeful production of carbon nanomaterials of specific allotropic form. The results of researches can be applied for designing of electro-discharge equipment of selective production of carbon nanomaterials.

Keywords: Electrical explosion of conductors, carbon nanomaterials, carbon phase trajectories.

Selection and installation of high-voltage protective ceramic resistors in charge-discharge circuits powerful capacitive energy storage / M.I. Baranov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 13-20. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

The results of calculation estimation of number of protective high-voltage ceramic permanent resistors are resulted in the charge-bit chains of powerful capacity stores of electric energy, in-use in different domestic and foreign electro-technologies. Findings of practical approbation offered approach are indicated on the choice of protective ceramic by volume permanent resistors in the examined electric chains of high-voltage impulsive technique.

Keywords: high-voltage capacity store of energy; charge-bit chain; protective resistor; calculation estimation of number of protective resistors.

The Main Indicators of Thermomechanical Protect of High Voltage Capacitors in the Charge-Discharge Circuits Powerful Capacitive Energy Storage from Emergency Overcurrent / M.I. Baranov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 20-27. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0740.

The results of calculation estimation of limitations are resulted set in the charge-bit chains of powerful capacity stores of energy (CSE) the protective high-voltage ceramic resistors of amplitudes of emergency very large currents, pressures and temperatures in the local area of internal electric hasp of the oil-immersed high-voltage impulsive condenser of the indicated chains of CSE and development in his liquid dielectric of heavy-current plasma channel of a spark discharge.

Keywords: powerful capacity store of energy; high-voltage condenser; protective resistor; estimation of limitations of current, pressure and temperature.

High-Voltage Controlled High Current Spark Gap With Graphite Electrodes RVGU-50 / M.I. Baranov, GM Koliushko, OS Nedzelskiy, AV Plichko, E.G. Ponuzhdaeva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 28-37. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

The article presents the specifications and description of the design of high-voltage spark gap RVHU-50. Arrester is designed to discharge switching circuit simulator lightning current pulse with an amplitude up to 220 kA pulse duration of 350 microseconds. Front duration current pulse – from a few to tens of microseconds. Graphite electrodes arresters provide a significant resource guide designed to lightning discharge switching circuit simulator lightning current pulse with an amplitude up to 220 kA pulse duration of 350 microseconds. Front duration current pulse

– from a few to tens of microseconds. Graphite electrodes arresters provide a significant resource exploitation simulator in tests of means for resistance against direct lightning with parameters corresponding to the maximum destructive factors. Arrester RVHU-50 was tested in the current simulator lightning surge current.

Keywords: Managed surge, graphite electrodes, lightning surge current simulator.

Modernization of measuring complex KDZ-1U / I.N. Bogatirov, V.I. Dotsenko, A.V. Plichko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 37-41. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

The article considers the modernization of the KDZ-1U for the diagnosis of grounding devices, which resulted in reduced power consumption, reduced dimensions and weight, improved ergonomics and accuracy of the determination of the parameters of grounding devices. This was achieved by increasing the efficiency of the generator, transformer replacement power supply by a switching power supply, improving the measurement of the complex, changes in the control system.

Keywords: modernization, diagnosis of grounding devices.

The dust removal efficiency by corona discharge field with various source voltages forms / L. Z. Boguslavskij, V. V. Diordijchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 41-48. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

The efficiency of dust removal from industrial wasted gases by electrostatic precipitation during corona discharge feeding by different types of high voltage is considered. Theoretically substantiated using particles passage length by an active zone like precipitation efficiency factor. The experimental values of particles passage length for various levels of DC voltage and for various frequency of combined voltage is carried out. The results shown that the AC voltage and pulse voltage does not able to hold dust removal efficiency on required level. But dust deposition gain is proved by using of DC voltage and pulse voltage superposition. Dust removal efficiency increases with reduction of electrical power consumption is proven in case of DC voltage and pulse voltage superposition.

Keywords: electrostatic precipitation, particles passage length, migration velocity, source voltage form.

Switched Power Supplies with adaptive control for efficient electrofiltration gas bursts with different impedance / L. Z. Boguslavsky, L. N. Miroshnichenko, L. E. Ovchinnikova, S. S. Kozyrev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 49-55. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

The problems of improving the effectiveness of electrofiltration differently impedance gas bursts through the use of additional switching power supplies with an adaptive control system. Established pulse power system for electrofiltration, thanks to an adaptive control system that provides adjustment parameters of the pulses of all generators in accordance with the current composition of the gaseous bursts, makes it possible to conduct effective destruction of all the tangible components throughout the treatment process, which promotes the most efficient use of energy for the destruction of each type of constructing different impedance gas bursts.

Keywords: Switched power supplies; adaptive control; electrofiltration; different impedance gas bursts.

Definition of the Metrological Characteristics of Small Antennas Measuring TEM camera / E.M. Vasileva, S.A. Vinnichenko, S.G. Bondar // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 56-60. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

The possibility of using a TEM camera for calibration of the different types of antennas, including measuring, is considered. The limitations due to the design of TEM camera is given, and discussed

hardware complex of measurements. The directions of works for expansion the functional possibilities of the complex are proposed.

Keywords: TEM-camera, the electromagnetic field, the calibration of antennas, electromagnetic compatibility.

Influence of stabilization and refining of liquid dielectric on dielectric strength of different constructions of film dielectric for high-voltage pulse capacitors / V.I. Gun'ko, A.Ya. Dmitrishin, A.P. Malyushevskaya, S.O. Toporov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 61-65. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0740.

The purpose of the article is an estimation of possibility of rejection from refining and stabilization of liquid dielectric for impregnation of high-voltage pulse capacitors and prognostication of the here expected average life-time of high-voltage pulse condensers with the different constructions of film dielectric. Researches about determination of short-time dielectric strength and life-time of sections on the base of the combined film dielectric structures of different thickness were made. As results were to get, that short-time dielectric strength of the systems with an unrefined impregnating with dielectric did not change practically, and an average life-time decreases from 2 to 4 times. The established regularities allow controlling of the processes of graphite conductor's electro-explosion at purposeful production of carbon nanomaterials of specific allotropic form.

Keywords: high-voltage pulse capacitor, liquid impregnate dielectric, dielectric strength, average expected life-time.

On Physics of Electromagnetic Compatibility of Electrical System / A.I. Doroshenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 66-72. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

In connection with the fact that the working body of the electric power system has its electromagnetic field, which can only exist in its dielectric srede, environmental conductive parts of the system and consisting of electromagnetic fields all its installations, it is proposed in the concept of electromagnetic compatibility of such systems to invest their ability to normal operation normal load them all electrical installations with the determination of the level of permissibility and necessity of such compatibility.

Keywords: power system, electromagnetic field, electromagnetic compatibility, the admissibility conditions and the need for electromagnetic compatibility.

Pulsed-discharge technology of powders treatment / A. D. Zaichenko, O. M. Syzonenko, E.M. Sheregii, Y. V. Lypian, A. S. Torpakov, N. S. Prystash, V. A. Tregub // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 73-81. – Bibliogr.: 21. – ISSN 2079-0740.

The scopes of pulsed-discharge technology of powders of different composition treatment with means of their dispersion, activation, initiation of initiation of structural phase transitions for creation of materials with high mechanical properties are considered. Treatment regimens that provide a required level of dispersion and the desired phase composition have been established for studied metal, hard and superhard materials powders.

Keywords: high voltage electric discharge, disperse environment, dispersion, activation, synthesis, surface modification, powders, metal carbides, diamonds, hard alloys, silicon carbide, boron carbide.

The Analysis Of Electromagnetic Compatibility on Oil Pumping Stations / Isam M. A. Abdelshafi // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 82-84. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-0740.

In the article the problem of ensuring electromagnetic compatibility of hectare oil pumping stations is considered. Lack of regulatory framework EMC for such objects leads to what is not

realized systematic approach to protection from hazardous electromagnetic influences. The analysis of sources and receivers of electromagnetic influences, possible risks and consequences because of non-compliance with electromagnetic compatibility is carried out. It consists of such remotely controlled power supplies for anode discharge, ion extraction and focusing of the extracted ion beam and power supplies for control of gas feed system. The power supply and control system of the multi-charged ions injector satisfies the requirements and ensures the stable injector operation.

Keywords: electromagnetic compatibility, oil pumping station

The power supply system and management of multivalent ion injector / S. G. Karpus // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 85-90. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

In 2010 in the NSC KIPT the multi-charged ions source (Pinning type with cold cathodes and the axial ion extraction system) for the electrostatic accelerator (ES) «SOKOL» was developed. The using of multi-charged ions beams extracted from this ion source empowers of analytical capabilities for IBA techniques. For coordination of multi-charged ions source and electrostatic accelerator the injector and power supply and control system were developed. In this paper the description of the power supply and control system of multi-charged ions injector is present. It consists of such remotely controlled power supplies for anode discharge, ion extraction and focusing of the extracted ion beam and power supplies for control of gas feed system. The power supply and control system of the multi-charged ions injector satisfies the requirements and ensures the stable injector operation.

Keywords: multi-charged ions injector, electrostatic accelerator, power supply and control system.

A methodology of harmonization of the level of stability of the automated checking and management system by a strategic object with possible levels of the electromagnetic noise accompanying a lightning digit / V.V. Kniaziev, V.I. Kravchenko, V.N. Dronov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 90-98. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0740.

A methodology of harmonization of level of stability of the automated checking and management system by a strategic object with possible electromagnetic noise accompanying a lightning digit levels is presented in the article. The statistical method of calculation of probability of lightning discharge in the elements of object, as initial implementation of methodology phase is considered in detail. The offered method allows to carry out: calculation of the probability of lightning discharge to the protected and unprotected objects taking into account the real structure of object (structures of building and building of object, structure of the lightning protection system; calculation of hit lightning of separate zones of objects probability, in particular for objects with a large area taking into account surrounding terms (high-voltage line of electric power, railways, etc.).

Keywords: lightning, probability, strength of lightning current, bit interval, level of stability, strategic object.

Electrophysical installations with high-gradient magnetic field to study the properties of the plasma reflex discharge / Yu.V.Kovtun, A.N.Ozerov, A.I.Skibenko, E.I.Skibenko, V.B.Yuferov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 98-109. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

The article describes the electrophysical installations with high-gradient magnetic field to study the properties of the plasma reflex discharge, which distinguishes it from similar devices developed and described in the literature previously. The main components and system installation. Calculated distribution of the magnetic field along the axis and the radius of the device. Held thermal design solenoids. Estimated conductivity of the vacuum system. Are also included working gas vent systems in a controlled manner and plasma diagnostics indicating the measuring

channels.

Keywords: reflective discharge, plasma, magnetic field, vacuum, solenoid, lapping gas.

Design and thermodynamic characteristics of the experimental model of the blocking device for operative commutations «UBOP» / G.M. Koliushko, O.S. Nedzelskiy, H.G. Ponuzhdayeva, R.K.Borisov, S.I. Khrenov, D.I. Kovalev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 109-114. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

Design of the experimental model of the blocking device for operative commutations «UBOP» is presented. This device is appointed to do in the safety blocking commutation systems for the high voltage energetics devices. The function of the key – mechanism with electromagnetic drive is described. The results of the experimental research of the thermodynamics characteristics of long-time working «UBOP» electromagnetic blocking drive is presented.

Key words: blocking device for operative commutations; key – mechanism; electromagnet; heating temperature.

Measuring of emission of current of radio interferences / Y.S.Nemchenko, N.D.Zhyvotov, A.I.Saraev, T.N.Ostroverkh // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 115-121. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

Modern methodology of measuring of emission of current of radio interferences is described from the on-board aircraft equipment by means of current monitoring transformer TS-A, created and calibrated in the Test laboratory of Research & Design Institute «Molniya». This methodology allows quickly and effectively to define: whether executed in the tested good of requirement on emission of currents of radio interferences on all operating in Ukraine normative documents in full. The standard requirements of DSTU IEC 61000-4-6: 2007 are required to perform in Ukraine.

Keywords: emission of current of radio interferences, current monitoring transformer, on-board aircraft equipment.

Installation U-KP-80 intended for test the technical facilities for immunity to conducted, common mode disturbances in frequency range from 150 kHz to 80 MHz / Y.S.Nemchenko; V.V.Kniyaziev, PhD; I.P. Lesnoy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 122-126. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

The design and results to qualifications of the installation U-KP-80, intended for test the technical facilities for immunity to conducted, common mode disturbances, induced by radio-frequency fields, in range from 150 kHz to 80 MHz with output voltage from 1 V to 10 V in accordance with acting in Ukraine Standard DSTU IEC 61000-4-6:2007, are described. The main components and system installation. Calculated distribution of the magnetic field along the axis and the radius of the device. Held thermal design solenoids. Estimated conductivity of the vacuum system. Are also included working gas vent systems in a controlled manner and plasma diagnostics indicating the measuring channels. Estimated conductivity of the vacuum system. Are also included working gas vent systems in a controlled manner and plasma diagnostics indicating the measuring channels.

Keywords: test, immunity, conducted common mode disturbance, installation, attestation.

Influence of stabilization and refining of liquid dielectric on dielectric strength of different constructions of film dielectric for high-voltage pulse capacitors / M.M. Rezinkina, O.L. Rezinin, E.E. Svetlichnaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 127-134. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

The statistical model of electrical physical processes at "choosing" of leader channel of lightning to strike objects on the ground, taking into account a possibility of extending them an upward spark. Compliance of this model with the considered processes has been validated by comparison of the calcu-

lated results on the probability of place of high-voltage discharge strike on the ground or located on it objects with known experimental data.

Keywords: lightning; leader channel, sample, mathematical modeling.

Comparison of possibilities of Wi-Fi and PLC networks employment for industrial equipment control / A.F. Rozvadovskiy, M.V. Rodionova, V.V. Pilinsky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 135-143. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0740.

The results of studies of possibilities to use Wi-Fi and PLC networks for equipment control, taking into account the electromagnetic compatibility (EMC) providing, are discussed. The advantages of each network for data transmission are described. There is shown, that PLC networks make it possible to ensure combined ways of transmission: both wired and wireless methods. This technology does not require special wiring pads, using power lines for data transmission, but for EMC providing it needs the additional shielding. This process widespread is hold by the lack of standard, regulating the level of interference emission. In turn, Wi-Fi technology, along with the wide distribution and high speed data transmission, requires special signal lines (twisted pairs, fiber optic, etc.) laying to the stable signal transmission. Thus, depending on the application, both types of technologies can be used.

Keywords: data transmission, Wi-Fi, PLC, network, EMC, electromagnetic field, shielding.

Increasing of the measurement of the sensitivity of the moisture content in transformer oil of dielectric method in resonant mode / V.V. Rudakov, A.A. Korobko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 143-149. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

The description of the coaxial design of the transducer for determining of low concentrations of moisture content in transformer oil is considered. The results of determining of the moisture content at low concentrations of 0.1% - 2% on the procedure which is based on the use of the dielectric method in resonant mode are given. The technique allows to calculate the moisture content by measuring a self resonant frequency for the two options of filling the transducer: clean oil, oil for testing, and switched off transducer. A measurement errors of resonant frequencies and the moisture content of the tested oil with a known in advance concentration of water which are gotten by the frequency meter «ЧЗ-34» are shown.

Keywords: moisture, transformer oil, emulsion, dielectric method, resonance method, the transducer.

Synthesis of SMS communications through Internet / V. A. Tkachenko, T. Ya. Hrychkovskiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 149-154. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

In the article the problems of analysis and synthesis of web-applications are considered on distribution of SMS messages over the Internet and questions of development of methods of creation of SMS communications are considered. The choice of protocols and SMS of gateways is reasonable. Software code was developed via Ruby on Rails for web applications and for the library of interaction between web application SMS Getaway and the GUI client part of the web application.

Keywords: SMS communication, SMS services, SMS Gateway, SMS messages, SMS centers, API, WEB interface.

Parameters of pulse corona on metal roads in strength electric field / A. Chernukhin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – C. 155-160. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0740.

The results of experimental researches of peak-temporal parameters of streamer crown are presented. Studies are undertaken on the lightning rods of different form of cross-sectional. Defined functional dependence of the current streamer corona on the magnitude of the electric field,

in which lightning rod is placed. Defined functional dependence of the current on the height of the streamer corona of lightning rod. Dependences of strength of current of crown are set on tension of electric-field and height of the lightning rods. The main components and system installation. Calculated distribution of the magnetic field along the axis and the radius of the device. Held thermal design solenoids.

Keywords: lightning rod, electric field, streamer, corona, strength of current.

Measurement of pulsed magnetic fields / S.P. Shalamov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 161-168. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

A review of methods for measuring pulsed magnetic fields (PMF) is held. The principles of operation of the PMF sensors are described on the basis of Hall's and Faraday's effects, magnetoresistance and terrasond. The features of using PMF are explained, their advantages and disadvantages are shown. A method based on electromagnetic induction is also discussed. The concept of designing the sensor is explained.

Keywords: pulsed magnetic field, Hall's effect, Faraday's effect, magnetoresistance effect, terrasond, electromagnetic induction.

The concept of improving the intelligent network EMI Filters / V. B. Shvaichenko, O.Sharadjah, D.V.Titkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 168-172. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

Offers methods to improve the efficiency of EMI filters, changing the selectivity based on the monitoring of the interference environment in the conductive circuits. The evaluation of cost-effectiveness and technical implementation using modern components. Conclusions about the possibility of remote control filters based on cloud computing and distributed forecasting changes the electromagnetic environment.

Keywords: intelligent network filters, concept, monitoring, cloud computing.

ЗМІСТ

<i>Бакларь В. Ю., Кускова Н. И., Хайнацкий С. А.</i> Электрофизические параметры синтеза углеродных наноструктур в процессе электровзрыва	3
<i>Баранов М. И.</i> Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии	12
<i>Баранов М. И.</i> Основные показатели термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии от аварийных сверхтоков	20
<i>Баранов М. И., Колиушко Г. М., Недзельский О. С., Пличко А. В., Понуждаева Е. Г.</i> Высоковольтный управляемый сильнотоочный искровой разрядник с графитовыми электродами РВГУ-50	28
<i>Богатырев И. Н., Доценко В. И., Пличко А. В.</i> модернизация измерительного комплекса КДЗ-1У	37
<i>Богуславский Л. З., Диордийчук В. В.</i> Эффективность осаждения пыли полем коронного разряда при различных типах питающего напряжения	41
<i>Богуславский Л. З., Мирошниченко Л. Н., Овчинникова Л. Е., Козырев С. С.</i> Импульсные источники питания с адаптивным управлением для эффективной электрофильтрации разноимпедансных газовых выбросов	49
<i>Васильева Е. М., Винниченко С. А., Бондарь С.Г.</i> Определение метрологических характеристик малогабаритных измерительных антенн в ТЕМ-камере	56
<i>Гуныко В. И., Дмитришин А. Я., Малюшевская А. П., Топоров С.О.</i> Влияние стабилизации и очистки жидкого диэлектрика на электрическую прочность различных конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов	61
<i>Дорошенко О. І.</i> Про фізику власної електромагнітної сумісності електроенергетичної системи	66
<i>Зайченко А. Д., Сизоненко О. Н., Шерегий Е. М., Липян Е. В., Торпаков А. С., Пристаи Н. С., Трегуб В. А.</i> Разрядно-импульсная технология обработки порошков	73
<i>Исам М. А. Абдельшафи</i> Анализ электромагнитной совместимости на нефтеперекачивающих станциях	82
<i>Карпусь С. Г.</i> Система питания и управления инжектора многозарядных ионов ЭСУ «СОКОЛ»	85

Князев В. В., Кравченко В. И., Дронов В. Н. Методика гармонизации уровня устойчивости системы автоматизированного контроля и управления стратегическим объектом с уровнями вероятных электромагнитных помех сопровождающих молниевый разряд	90
Ковтун Ю. В., Озеров А. Н., Скибенко Е. И., Юферов В. Б. Электрофизическая установка с высокоградиентным магнитным полем для исследования свойств плазмы отражательного разряда	98
Колиушко Г.М., Недзельский О.С., Понуждаева Е.Г., Пличко А.В., Ковалев Д.И. Конструкция и термодинамические показатели опытного образца устройства блокировки оперативных переключений УБОП . . .	109
Немченко Ю. С., Животов Н. Д., Сараев А. И., Островерх Т. Н. Измерение тока кондуктивных радиопомех	115
Немченко Ю. С., Князев В. В., Лесной И. П. Установка У-КП-80 для испытаний технических средств на невосприимчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц	122
Резинкина М. М., Резинкин О. Л., Светличная Е. Е. Статистическое моделирование ориентировки молнии на наземные объекты с учетом возможности возникновения встречной искры	127
Розвадовский А. Ф., Родионова М. В., Пилинский В. В. Сравнение возможностей использования WI-FI и PLC сетей для управления производственным оборудованием	135
Рудаков В. В., Коробко А. А. Повышение чувствительности измерений содержания влаги в трансформаторном масле диэлькометрическим методом в резонансном режиме	143
Ткаченко В. А., Гричковский Т. Я. Синтез СМС-коммуникаций через Internet	149
Чернухин А. Ю. Параметры импульсной короны на металлических стержнях в сильном электрическом поле	155
Шаламов С. П. Измерение импульсных магнитных полей	161
Швайченко В. Б., Шарадга О., Титков Д. В. Концепция совершенствования интеллектуальных сетевых помехоподавляющих фильтров . . .	168
Рефераты	173
Рефераты	180
Abstracts	187

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:

Техніка та електрофізика високих напруг

№ 50 (1092)

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 № 88-14.

Підп. до друку 10.11.2014 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, вл Фрунзе, 21

Друкарня ВАТ «Цифра Прінт».

Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.

Адреса: 61166, м. Харків, вул. Данилевського, 30.
