

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCES OF UKRAINE

National technical university  
"Kharkiv polytechnic institute"

## **BULLETIN**

**of the National  
Technical University "KhPI"  
Series: Technique and  
Electrophysics of High Voltage**

« »  
:

№ 18 (1343) 2019

No. 18 (1343) 2019

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2019

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2019

». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2019. – № 18 (1343). – 78 с. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print)

В збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконали викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ. Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

Державне видання  
Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України  
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

« :  
». внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

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

Засновник  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder  
National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

**Editor-in-chief**

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of NAS of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Марченко А.П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

**Deputy editor-in-chief**

Marchenko A.P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

**Secretary**

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

**Editorial staff**

*Відповідальний редактор:*

В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.

*Associate editor:*

V. Kravchenko, Prof., Dr. Tech. Sci.

*Відповідальний секретар:*

Л. В. Ваврив, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.

*Executive secretary:*

L. Vavriv, PhD. Phys.-Math. Sci., Senior Researcher.

*Члени редколегії:*

М. І. Баранов, д-р техн. наук, ст. наук. співр.;

*Editorial staff members:*

M. Baranov, Dr. Tech. Sci., Main Res. – deputy editor-in-chief;

М. І. Бойко, д-р техн. наук, доц.;

M. Boiko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

А. Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.;

A. Gurin, Dr. Tech. Sci., Prof.;

Б. В. Клименко, д-р техн. наук, проф.;

B. Klimenko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

В. В. Князев, канд. техн. наук, ст. наук. співр.;

V. Knyazev, PhD. Tech. Sci., Leading Researcher;

О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;

O. Serkov, Dr. Tech. Sci.,

Є. І. Сокол, д-р техн. наук, проф.;

E. Sokol, Dr. Tech. Sci., Prof.;

І. В. Яковенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.;

I. Yakovenko, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof.;

Х. Радев, проф., Технічний ун-т, Софія, Болгарія;

H. Radev, Prof., Technical university of Sofia, Bulgaria;

Ф. Д'Алессандро, д-р філ., компанія PhysElec, Тасманія, Австралія;

F. D'Alessandro, PhD, SMIEE, PhysElec, Tasmania, Australia;

С. Гржибовскі, проф., Державний ун-т Міссісіпі, США;

S. Grzybowski, Dr. Hab., PhD, LF IEEE, Prof. Mississippi State University, USA;

М. Рок, проф., Технічний ун-т Ільменау, Німеччина

M. Rock, Prof., Dr-Ing., Technical University Ilmenau, Germany

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ». Протокол № 07 від 05 липня 2019 р.

УДК 621.314

· · · · · , · · · · · , · · · · · , · · · · · , · · · · ·

·

Целью настоящего рассмотрения является получение расчетных соотношений для характеристик электромагнитного процесса при непосредственном возбуждении последовательного резонансного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения с частотой следования, равной собственной частоте контура. Данный вопрос возникает в технике больших токов и сильных магнитных полей, где требуется достаточно строгая настройка аппаратуры на фиксированные рабочие частоты. Кроме того, резонанс напряжений представляет практический интерес, например, для питания повышенным напряжением высокоомных нагрузок, для создания устройств индукционного нагрева. В настоящей работе решением задачи о переходном процессе найдены временные формы возбуждаемого тока. Следует особо подчеркнуть, что принимаемая постановка задачи позволяет сконцентрироваться на проблеме формирования квазигармонического тока и напряжения при ангармоническом резонансном возбуждении активно-реактивного контура с фиксированной собственной частотой. Научная новизна состоит в получении расчетных соотношений для характеристик процесса в переходном режиме, когда ангармонический источник напряжения непосредственно подключается к резонансному электрическому контуру. Важность решаемой задачи обусловлена практическими проблемами в разработках электротехнических устройств, где действенность соответствующих элементных составляющих практически возможна только в условиях, с достаточной степенью близких к резонансным. Практическая значимость: полученные выражения для токов, возбуждаемых при непосредственном подключении источника ангармонического напряжения к последовательному резонансному активно-реактивному контуру, необходимы для дальнейшего анализа протекающих процессов при проектировании электротехнических устройств с резонансными компонентами. Пути дальнейших исследований: весьма перспективным в направлении дальнейших исследований видится анализ протекающих процессов при непосредственном возбуждении резонанса напряжений в последовательном активно-реактивном контуре серией ангармонических сигналов.

: резонанс напряжений, активно-реактивный контур, ангармонический сигнал, прямоугольный импульс напряжения, переходный режим, амплитудно-временная зависимость.

· · · · · , · · · · · , · · · · · , · · · · · , · · · · ·

·

Метою цього розгляду є отримання розрахункових співвідношень для характеристик електромагнітного процесу при безпосередньому збудженні послідовного резонансного активно-реактивного контуру періодичними серіями з прямокутних униполярних або осцилюючих імпульсів напруги з частотою проходження, що дорівнює власній частоті контуру. Дане питання виникає в техніці великих струмів і сильних магнітних полів, де потрібна досить точна настройка апаратури на фіксовані робочі частоти. Крім того, резонанс напруг становить практичний інтерес, наприклад, для живлення підвищеною напругою високоомних навантажень, для створення пристроїв індукційного нагріву. В даній роботі рішенням завдання про перехідний процес знайдені часові форми струму, що збуджується. Слід особливо підкреслити, що постановка задачі, яка приймається, дозволяє сконцентруватися на проблемі формування квазигармонічних струму і напруги при ангармонічному резонансному збудженні активно-реактивного контуру з фіксованою власною частотою. Наукова новизна полягає в отриманні розрахункових співвідношень для характеристик процесу в перехідному режимі при безпосередньому підключенні до резонансного електричного контуру ангармонічного джерела напруги. Значимість задачі, що розв'язується, обумовлена практичними завданнями в розробках електротехнічних пристроїв, де дієвість відповідних елементних складових практично можлива лише в умовах, з достатнім ступенем близьких до резонансних. Отримані вирази для струмів, що збуджуються при безпосередньому підключенні джерела ангармонічної напруги до послідовного резонансного активно-реактивного контуру, необхідні для подальшого аналізу процесів, що протікають при проектуванні електротехнічних пристроїв з резонансними компонентами. Шляхи подальших досліджень: вельми перспективним в напрямку подальших досліджень є аналіз процесів, що протікають при безпосередньому збудженні резонансу напруг у послідовному активно-реактивному контурі серією ангармонічних сигналів.

: резонанс напруг, активно-реактивний контур, ангармонічний сигнал, прямокутний імпульс напруги, перехідний режим, амплітудно-часова залежність.

**YU.V. BATYGIN, A.YU. BONDARENKO, .F. YERYOMINA, S.A. SHINDERUK, G.S. SERIKOV**

### **DIRECT EXCITATION OF A SEQUENTIAL RESONANT CIRCUIT BY RECTANGULAR PULSE VOLTAGE. CALCULATED RELATIONS**

The purpose of this consideration is to obtain ratios for the electromagnetic process characteristics with the direct excitation of a series resonant active-reactive circuit with periodic series of rectangular unipolar or oscillating voltage pulses with a repetition frequency equal to the natural frequency of the circuit. This question arises in the technique of high currents and strong magnetic fields, where a

© Ю.В. Батыгин, А.Ю. Бондаренко, Е.Ф. Еремина, С.А. Шиндерук, Г.С. Сериков, 2019

fairly strict adjustment of the equipment to fixed operating frequencies is required. In addition, the voltage resonance is of practical interest, for example, to supply high-voltage loads, to create induction-heating devices. In this work, the transient process has found temporary forms of the excited current. It should be especially emphasized that the problem formulation taken in this way makes it possible to concentrate on the problem of the formation of quasi-harmonic current and voltage during anharmonic resonant excitation of an active-reactive circuit with a fixed natural frequency. The scientific novelty consists in obtaining the calculated ratios for the characteristics of the process in a transient mode with direct connection to the resonant electric circuit of the anharmonic voltage source. The significance of the problem to be solved is due to practical problems in the development of electrical devices, where the effectiveness of the corresponding elemental components is practically possible only in conditions with a sufficient degree close to resonance. Practical significance: the obtained expressions for the currents excited by the direct connection of the anharmonic voltage source to the series resonant active-reactive circuit are necessary for further analysis of the processes taking place in the design of electrical devices with resonant components. Ways to further research: the analysis of the processes taking place with the direct excitation of a voltage resonance in a sequential active-reactive circuit by a sequence of anharmonic signals is very promising in the direction of further research.

**Keywords:** voltage resonance, active-reactive circuit, anharmonic signal, rectangular voltage pulse, transient mode, amplitude-time dependence.

. Резонанс, как явление природы во всех ее проявлениях, имеет позитивное и негативное значение. Если говорить о негативе, то наиболее ярким примером можно назвать событие 1905 года в Петербурге, где после перехода кавалерийского эскадрона обрушился Египетский мост через реку Фонтанку. Причина заключалась в том, что церемониальный марш дрессированных лошадей попал в резонанс с периодом собственных колебаний мостовых опор. В результате напряженное состояние превысило заложенный запас прочности, и мост рухнул [1]. Таких описаний с вредными последствиями резонанса в истории техники можно найти достаточно много. Наряду с этим есть также и многочисленные примеры использования резонанса как полезного явления, в частности, для создания различных электротехнических устройств.

. В технике больших токов и сильных магнитных полей явление резонанса позволяет настраивать аппаратуру на заданные частоты, что обеспечивает ее работу с максимальной эффективностью [2,3]. Как известно, существует два вида электрических резонансов – это «резонанс токов» и «резонанс напряжений». Последний представляет практический интерес, например, для питания повышенным напряжением высокоомной нагрузки, для создания эффективных устройств индукционного нагрева и др. [4-10].

Если остановиться на резонансе напряжений, то его сущность можно представить следующим образом. В контуре с последовательным соединением резистора, электрического конденсатора и соленоида (последовательный активно-реактивный контур) при возбуждении синусоидального сигнала определенной частоты будет иметь место нулевое реактивное сопротивление. Физически данный факт объясняется резонансом, суть которого состоит в том, что при протекании тока происходит переход магнитной энергии соленоида в электрическую энергию конденсатора и наоборот. Следует подчеркнуть, что этот эффект проявляется только для синусоидального сигнала в установившемся режиме на определенной частоте, величина которой тесно связана с параметрами контура [4,12].

Отмеченные выше условия резонанса напряже-

ний требуют исследований его возникновения в практически интересных случаях, когда последовательный активно-реактивный контур возбуждается ангармоническими сигналами, спектр которых наряду с основной частотой колебаний содержит, так называемые, высшие гармоники с частотами, кратными основному типу колебаний [11,12].

Целью настоящего рассмотрения является анализ процесса при непосредственном резонансном возбуждении последовательного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения.

Научная новизна состоит в получении расчетных соотношений для характеристик процесса в переходном режиме, когда ангармонический источник напряжения непосредственно подключается к резонансному электрическому контуру. Значимость решаемой задачи обусловлена практическими задачами в разработках электротехнических устройств, где действенность соответствующих элементных составляющих практически возможна только в условиях, с достаточной степенью близких к резонансным.

. Схема замещения исследуемого последовательного активно-реактивного контура и временные формы возбуждающего напряжения представлены на рис. 1. На схеме  $R$ ,  $L$ ,  $C$  – элементы контура,  $E(t)$  – источник напряжения с внутренним сопротивлением  $R_0$ .

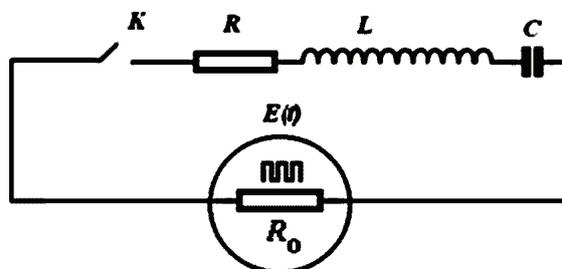


Рис. 1. Схема замещения последовательного резонансного контура

Принимаемые допущения: сопротивление соединительных проводов и проводов обмотки индуктивности  $R_1$ , а также внутреннее сопротивление источника

напряжения  $R_0$  достаточно малы, так что их сумма много меньше реактивных сопротивлений контура,

$$(R_0 + R_1) \ll \omega_0 L \quad \text{и} \quad (R_0 + R_1) \ll \frac{1}{\omega_0 C},$$

где  $\omega_0$  – собственная частота;

$L$  – индуктивность;

$C$  – емкость.

Источник питания генерирует последовательность прямоугольных импульсов напряжения с амплитудой  $E_m$  и частотой следования  $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$  ( $T$  – период), равной собственной частоте контура  $\omega_0$ , так что  $\omega_0 = \omega_1$ .

Амплитудно-временные формы возбуждающих сигналов  $E(t)$  – осциллирующие или униполярные прямоугольные импульсы с длительностью, равной половине периода их следования (рис. 2 а, б).

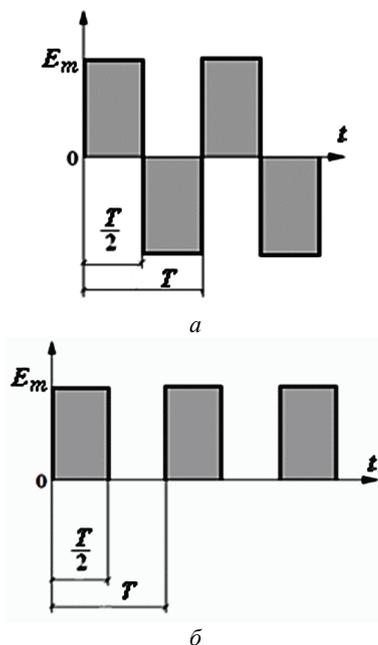


Рис. 2. Временные формы возбуждающих импульсов напряжения: а – осциллирующие; б – униполярные прямоугольные импульсы

Особо подчеркнем, что принимаемая постановка задачи позволяет сконцентрироваться на проблеме формирования квазигармонических тока и напряжения при резонансном возбуждении активно-реактивного контура ангармоническими сигналами.

При решении поставленной задачи воспользуемся операторным методом расчета электрических цепей [4,11].

Дифференциальное уравнение относительно напряжения на емкости  $U_C(t)$  в пространстве изображений по Лапласу при нулевых начальных условиях

$$U_C(0) = \frac{dU_C(0)}{dt} = 0 \quad \text{имеет вид [11,12]:}$$

$$p^2 U_C(p) + 2\delta \cdot p U_C(p) + \omega_0^2 \cdot U_C(p) = \omega_0^2 \cdot E(p), \quad (1)$$

где  $p$  – оператор Лапласа;

$$U_C(p) = L\{U_C(t)\}; \quad E(p) = L\{E(t)\};$$

$$\delta = \frac{L}{2(R_0 + R_1)} \text{ – декремент затухания;}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ – собственная частота контура.}$$

Решение уравнения (1) позволяет найти  $L$ -изображение возбуждаемого тока [13].

$$I(p) = C \cdot p U_C(p) = \frac{1}{L} \cdot F(p) \cdot E(p), \quad (2)$$

$$\text{где } F(p) = \frac{(p+\delta)}{(p+\delta)^2 + \omega^2} - \frac{\delta}{\omega} \cdot \frac{\omega}{(p+\delta)^2 + \omega^2};$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}.$$

Оригинал выражения (2) запишется как свертка функций [8].

$$I(t) = \frac{1}{L} \cdot F(t) * E(t), \quad (3)$$

где  $F(t) \leftrightarrow F(p)$ ;  $E(t) \leftrightarrow E(p)$  – оригиналы сомножителей в формуле (2).

Согласно постановке задачи, диссипация энергии минимальна, что означает достаточную малость величины относительного декремента затухания

$$\delta_0 = \frac{\delta}{\omega} \ll 1 \quad \text{и равенство частоты возбуждаемого}$$

сигнала собственной частоте исследуемого резонансного контура  $\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . В этом случае выражение для  $F(p)$  в выражении (2) можно упростить.

После перехода в пространство оригиналов [12] получаем следующую зависимость

$$F(p) \approx \frac{(p+\delta)}{(p+\delta)^2 + \omega_0^2} \leftrightarrow F(t) = e^{-\delta t} \cos(\omega_0 \cdot t). \quad (4)$$

Свертка функций в выражении (3) с учетом (4) при введении фазовой зависимости вместо временной [12] в развернутом виде принимает вид:

$$I(\varphi) = \frac{1}{(\omega_0 \cdot L)} \cdot \int_0^{\varphi} e^{-\delta_0(\varphi-x)} \cdot \cos(\varphi-x) \cdot E(x) dx, \quad (5)$$

где  $\varphi = \omega_0 t$  – фаза,

$$\delta_0 = \frac{\delta}{\omega_0} \text{ – относительный декремент затухания.}$$

Амплитудно-временную зависимость возбуждающего напряжения из последовательности осциллирующих прямоугольных импульсов (рис. 2, а) мож-

но представить разложением Фурье по синусам кратных дуг [12]:

$$E(\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \sin(\omega_n \cdot \varphi), \quad (6)$$

где  $E_n = \frac{2}{\pi} E_m \cdot \frac{(-1)^n - 1}{n^2 - 1}$  и  $\omega_n = \frac{2\pi}{T} \cdot n$  – амплитуды и относительные частоты гармоник спектрального разложения, соответственно.

Ряд (6) поставим под знак интеграла в выражении (5). Учтем малость относительного декремента затухания. Полученный результат преобразуем, полагая, что собственная частота контура совпадает с частотой первой гармоники разложения (6). После выполнения необходимых тождественных преобразований получаем амплитудно-временную зависимость для тока, возбуждаемого в режиме резонанса напряжений всеми гармониками входного сигнала.

Согласно определению и формуле (5), находим, что

$$I_{\text{sum}}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E_m}{(R_0 + R)} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + \frac{1}{Q} \cdot G_1(t), \quad (7)$$

где  $Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{(R_0 + R)}$  – добротность контура,

$$G_1(t) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n - 1}{n^2 - 1} \cos(n(\omega_0 t)).$$

Аналогично предыдущему получим амплитудно-временную зависимость для тока при резонансном возбуждении  $RLC$  – контура периодической последовательностью униполярных прямоугольных импульсов напряжения длительностью, равной половине периода повторения (рис. 2, б).

Соответствующую фазовую (амплитудно-временную) зависимость представим разложением Фурье по косинусам кратных дуг [8]:

$$E(\varphi) = \frac{\pi}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \cos \omega_n \cdot \varphi - \frac{\pi}{2}, \quad (8)$$

где  $E_n = \frac{2}{\pi} \cdot E_m \cdot \frac{\sin n \cdot \frac{\pi}{2}}{n}$  и  $\omega_n = \frac{2\pi}{T} \cdot n$  – амплитуды и относительные частоты гармоник спектрального разложения, соответственно.

Вычислим интеграл в выражении (5) с подстановкой разложения (8).

Пренебрегая бесконечно малыми слагаемыми порядка  $\sim \delta_0$ , после введения резонансных условий для первой гармоники входного сигнала получаем выражение для возбуждаемого тока с учетом всех гармонических составляющих спектра.

$$I_{\text{sum}}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E_m}{(R_0 + R)} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + \frac{1}{Q} \cdot G_2(t), \quad (9)$$

$$\text{где } G_2(t) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sin n \cdot \frac{\pi}{2}}{n} \cdot \cos n \cdot \omega_0 t - \frac{\pi}{2}.$$

Полученные выражения для токов являются решениями поставленной задачи и могут служить основой для дальнейшего теоретического анализа процессов в последовательном резонансном активно-реактивном контуре при его возбуждении прямоугольными импульсами напряжения.

. Получены базовые аналитические выражения для характеристик электромагнитных процессов при непосредственном резонансном возбуждении последовательного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения.

Дальнейшими перспективами являются теоретические исследования, анализ и численные оценки с последующим переходом к экспериментам для обоснования практической дееспособности способов возбуждения резонансных контуров ангармоническими сигналами.

1. Почему обрушился Египетский мост в Санкт-Петербурге? (Катастрофа на Египетском мосту). Материалы сайта. 2017. Режим доступа: <http://petrogazeta.ru/history/246>
2. Резонансный усилитель мощности тока промышленной частоты. Материалы сайта. 2010. Режим доступа: <http://allpowr.su/ru/33>
3. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. Москва: Наука, 2004. 705 с.
4. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей: Учебник для ВУЗов / под ред. Бакалова В.П. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Горячая линия, Телеком, 2007. 597 с.
5. Барбашова М.В., Сабокарь О.С., Сябрук А.С. Анализ электромагнитных процессов нагрева немагнитных металлов полем плоского кругового соленоида. Автомобиль і електроніка. Сучасні технології. Харків: ХНАДУ. 2015. № 8. С. 176-181.
6. Волонцевич Д.О., Барбашова М.В., Радченко Е.С. Расчет полей в комбинированных индукторных системах – инструментах рихтовки металлических покрытий автомобильных кузовов. Харків: Електротехніка і електромеханіка. 2015. № 3. С. 55-58.
7. Гнатов А.В., Шиндерук С.А., Сабокарь О.С., Худир Х., Тесленко Д.С. Анализ индуцированных токов при индукционном нагреве плоским прямоугольным многовитковым соленоидом. Автомобиль і електроніка. Сучасні технології. Харків: ХНАДУ. 2015. № 8. С. 213-217.
8. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Estimating the limit possibilities of the step charging system for capacitive energy storage. Електротехніка і електромеханіка. 2016. № 1. С. 35–37.
9. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А., Сабокарь О.С. Резонанс во вторичном контуре трансформатора Тесла при возбуждении гармоническим напряжением. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: математичне моделювання в техніці та технологіях. 2017. № 30 (1252). С. 21-27.

10. Batygin Yu.V., Shinderuk S.A., Serikov G.S., The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. Danish Scientific Journal. 2018. № 11-1. P. 72-79.

11. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. Учебник. 3-е изд. СПб: Лань. 2009. 432 с.

12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Москва: Наука, 1973. 832 с.

### References (transliterated)

1. Pochemu obrushilsya Yegipetskiy most v Sankt-Peterburge? (Katastrofa na Yegipetskom mostu) [Why did the Egyptian bridge collapse in St. Petersburg? (The crash on the Egyptian bridge)] Site materials. 2017. Access mode <http://petrogazeta.ru/history/246>

2. Rezonansnyy usilitel' moshchnosti toka promyshlennoy chastoty. [Resonant power amplifier current power frequency]. Site materials. 2010. Access mode: <http://allpowr.su/ru/33>

3. Mesyats G.A. Impul'snaya energetika i elektronika [Pulsed power and electronics]. Moscow: Nauka. 2004. 705 p.

4. Bakalov V.P., Dmitriyev V.F., Kruk B.I. Osnovy teorii tsepey: [Fundamentals of the theory of chains] Uchebnyk dlya VUZov / pod red. Bakalova V.P. 3-ye izd., pererab. i dop. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom, 2007. 597 p.

5. Barbashova M.V., Sabokar O.S., Syabruk A.S. Analiz elektromagnitnykh protsessov nagreva nemagnitnykh metallov polem ploskogo krugovogo solenoida. [Analysis of the electromagnetic processes of heating of non-magnetic metals by the field of a flat circular solenoid]. Avtomobil' i yelektronika. Suchasni tekhnologii [Car and electronics. Modern technologies]. Kharkiv: KHNADU. 2015. № 8. P. 176-181.

6. Volontsevich D.O., Barbashova M.V., Radchenko Ye.S. Raschet poley v kombinirovannykh induktivnykh sistemakh - instrumentakh rikhtovki metallicheskiy pokrytiy avtomobil'nykh kuzovov [Calculation of fields in the combined inductor systems - tools for the straightening of metallic coatings of automobile bodies]. Kharkiv: Electrical engineering & electromechanics. 2015. № 3. P. 55-58.

7. Gnatov A.V., Shinderuk S.A., Sabokar' O.S., Khudir KH., Teslenko D.S. Analiz indutsirovannykh tokov pri induktsionnom nagreve ploskimt pryamougol'nym mnogovitykovym solenoidom. [Analysis of induced currents during induction heating with a flat-rectangular multi-turn solenoid] Avtomobil' i yelektronika. Suchasni tekhnologii. Kharkiv: KHNADU. 2015. № 8. P. 213-217.

8. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S. Estimating the limit possibilities of the step charging system for capacitive energy storage. Electrical engineering & electromechanics. 2016. № 1. P. 35-37.

9. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Sabokar' O.S. Rezonans vo vtorichnom konture transformatora Tesla pri vzbuzhdenii garmonicheskim napryazheniem [Resonance in the secondary circuit of the Tesla transformer when excitation by the harmonic voltage]. Visnik NTU «KhPI». Seriya: matematichne modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh [Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies]. 2017. № 30 (1252). P. 21-27.

10. Batygin Yu.V., Shinderuk S.A., Serikov G.S. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. Danish Scientific Journal. 2018. № 11-1. P. 72-79.

11. Atabekov G.I. Osnovy teorii tsepey [Fundamentals of circuit theory]. Uchebnyk. 3-е изд. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2009. 432 p.

12. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov) [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p.

Поступила (received) 23.05.2019

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

(**Batygin Yuriy Victorovich**) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1278-5621>; e-mail: [yu.v.batygin@gmail.com](mailto:yu.v.batygin@gmail.com).

(**Bondarenko Oleksandr Yuriyovich**) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; доцент кафедри інженерної електрофізики, тел.: (057)7076245; e-mail: [abondarenko51@gmail.com](mailto:abondarenko51@gmail.com).

(**Yeryomina Olena Fedorivna**) – кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8123-1104>; e-mail: [elena.yeryomina@gmail.com](mailto:elena.yeryomina@gmail.com)

(**Shinderuk Svitlana Olexandrivna**) – кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6354-4174>; e-mail: [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net).

(**George Sergeevich Serikov**) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри автомобільної електроніки, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9578-1211>; e-mail: [georgy301212@gmail.com](mailto:georgy301212@gmail.com).

УДК 621.314

. . . , . . . , . . . , . . .

Впервые предложена цилиндрическая индукторная система с внутренним коаксиальным соленоидом, обмотка которого выполнена в виде бифиляра так, что гармонические токи в каждой из его жил направлены в противоположные стороны. В кратком обзоре литературы дано описание основных применений бифилярных конструкций, как элементов современных электротехнических устройств. Решением краевой задачи электродинамики найдены аналитические зависимости для напряженностей возбуждаемых полей и магнитного потока, позволяющих анализировать основные характеристики процессов. Полученные соотношения описывают стационарное состояние возбуждаемых электромагнитных полей в идеализации достаточно высокой проводимости металла обмотки внешнего соленоида-индуктора при отсутствии влияния токопроводов бифиляра на протекающие процессы.

: бифилярная катушка, цилиндрическая индукторная система, напряженность электромагнитного поля, магнитный поток, временные параметры тока, идеальный проводник.

. . . , . . . , . . . , . . .

Вперше запропоновано циліндрична індукторна система з внутрішнім коаксіальним соленоїдом, обмотка якого виконана у вигляді біфіляра так, що гармонійні струми в кожній з його жил спрямовані в протилежні сторони. У короткому огляді літератури дано опис основних застосувань біфілярних конструкцій, як елементів сучасних електротехнічних пристроїв. Рішенням крайової задачі електродинаміки знайдені аналітичні залежності для напруженостей збуджуваних полів і магнітного потоку, що дозволяють аналізувати основні характеристики процесів. Отримані співвідношення описують стаціонарний стан збуджуваних електромагнітних полів в ідеалізації досить високої провідності металу обвитки зовнішнього соленоида-індуктора при відсутності впливу струмоводів біфіляра на процеси, які відбуваються.

: біфілярна катушка, циліндрична індукторна система, напруженість електромагнітного поля, магнітний потік, часові параметри струму, ідеальний провідник.

*YU.V. BATYGIN, A.YU. BONDARENKO, S.A. SHINDERUK, G.S. SERIKOV*

#### DESIGN RELATIONSHIPS FOR A CYLINDRICAL INDUCTOR SYSTEM WITH AN INTERNAL BIFILARY SOLENOID

A cylindrical inductor system with an internal coaxial solenoid was first proposed. The coil of the coaxial solenoid is made in the form of a bifilar. The harmonic currents in each of the cores of the winding of the bifilar are directed in opposite directions. A brief review of the literature describes the main and most significant applications of bifilar structures, as elements of modern electrical devices, for example, low-inductance ohmic resistances, relay coils, electronic systems, etc. Analytical dependencies for the strengths of the excited fields and magnetic flux are determined when solving the boundary problem of electrodynamics. The obtained analytical dependences allow the analysis and calculation of the main characteristics of the processes occurring in the proposed design of the inductor system. The obtained relations describe the stationary state of the excited electromagnetic fields in the idealization of a sufficiently high conductivity of the metal winding of the external solenoid-inductor. The calculations did not take into account the influence of the conductors of the bifilar on the electromagnetic processes in the inductor system.

**Keywords:** bifilar coil, cylindrical inductor system, electromagnetic field strength, magnetic flux, current temporal parameters, ideal conductor.

. Бифилярная катушка – это электромагнитная катушка, которая содержит две близко расположенные, параллельные обмотки. В зависимости от назначения, токи в ее обмотках могут протекать как в одном, так и в противоположных направлениях. В последнем, практически наиболее интересном случае, магнитное поле одной обмотки равно и направлено противоположно по отношению к полю другой. Их суперпозиция приводит к взаимной нейтрализации, что означает равенство нулю коэффициента самоиндукции катушки в целом.

В современной электронной технике бифилярные

катушки часто используют как один из способов создания проволочных резисторов с достаточно малой индуктивностью [1]. Бифилярные катушки применяются в обмотках реле или трансформаторов. Их используют в импульсных источниках электрического питания благодаря их способности подавлять обратную электродвижущую силу [2,3]. Бифилярные катушки могут использоваться, например, для генерации магнитных импульсов любой формы и длительности, увеличения широкополосности и устранения нежелательных резонансов в радиотехнических устройствах и др. [4]. Следует отметить, что бифилярные катушки

© Ю.В. Батыгин, А.Ю. Бондаренко, С.А. Шиндерук, Г.С. Сериков, 2019

применялись даже в экспериментах для получения антигравитации [5].

Расчетам электромагнитных полей соленоидов различной геометрии посвящены многочисленные работы различных авторов, например [6-10]. Так, в работах [6-8] используются расчетные модели, предполагающие использование аналитических методов решения краевых задач математической физики. Для типичных конфигураций соленоидов – инструментов в магнитно-импульсной обработке металлов определены пространственно-временные распределения возбуждаемых полей и индуцированных токов. Вычислены фундаментальные характеристики экспериментальных образцов разного конструктивного исполнения. В работах [9-10] предложены методы численного моделирования электромагнитных процессов в цилиндрических и плоских катушках различного назначения. Направленность выделенных работ устанавливалась вопросами создания эффективных конструкций источников магнитных полей для решения соответствующих производственных задач.

С практической точки зрения представляют интерес исследования систем, в которых бифилярные катушки размещаются либо внутри, либо поверх цилиндрических соленоидов в схемах оборудования для магнитно-импульсной обработки металлов [6,7]. С физической точки зрения цилиндрическая геометрия бифиляра нарушает симметрию обмоток, относительно друг друга в сравнении с плоским вариантом исполнения. Кроме того, интересен вклад металла внешнего соленоида в протекающие электромагнитные процессы.

– предложение конструктивного исполнения и вывод аналитических зависимостей для расчета характеристик электромагнитных процессов в предложенной цилиндрической индукторной системе с внутренним коаксиальным соленоидом, обмотка которого выполнена в виде бифиляра так, что токи в каждой из его жил направлены в противоположные стороны.

состоит в предложении конструктивного исполнения и получении аналитических выражений для расчета характеристик электромагнитных процессов в цилиндрической индукторной системе с внутренним коаксиальным соленоидом, обмотка которого выполнена в виде бифиляра так, что токи в каждой из его жил направлены в противоположные стороны, при этом внешнее магнитное поле обращается в нуль.

. Расчетная модель исследуемой системы представлена на рис. 1.

При решении поставленной задачи примем следующие допущения:

1. В принятой цилиндрической системе координат индукторная система является достаточно протяженной (краевыми эффектами пренебрегаем) и аксиально-симметричной, так что  $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$ ,  $\varphi$  – азимутальный угол.

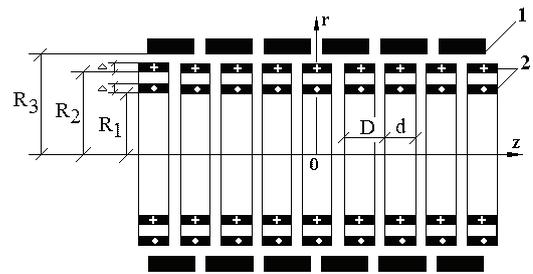


Рис. 1. Расчетная модель индукторной системы с внутренней бифилярной обмоткой:

1 – внешний индуктор с внутренним радиусом  $R_3$ ; 2 – внутренняя бифилярная обмотка;  $R_1, R_2$  – радиусы внутренней и внешней частей бифиляра;  $D$  – шаг намотки;  $d$  – ширина витков бифиляра

2. Внешний индуктор отключен, его витки выполнены из металла с высокой электропроводностью, достаточно плотно прилегают друг к другу, так что их внутреннюю поверхность можно считать сплошной поверхностью из идеального проводника.

3. Витки бифилярной обмотки выполнены из металлической ленты (толщина –  $\Delta$ , ширина –  $d$ , радиусы внутренней и внешней намоток –  $R_{1,2}$ , шаг намоток –  $D$ ), «прозрачны» для возбуждаемых полей (так что  $\frac{\Delta}{\delta} \ll 1$ , где  $\delta$  – величина скин-слоя) и не влияют на протекающие электромагнитные процессы [8, 11].

4. В бифиляре протекает гармонический ток с плотностью

$$j_{\varphi}(t, r, z) = j_m \cdot \sin(\omega t) \cdot f(R) \cdot g(z),$$

где  $j_m = \frac{J_m}{(d \cdot \Delta)}$  – амплитуда плотности,

$J_m$  – амплитуда тока,

$\omega$  – циклическая частота,

$f(r), g(z)$  – функции радиального и продольного распределений.

5. Временные параметры возбуждающего тока удовлетворяют квазистационарному приближению по Ландау –  $\frac{\omega}{c} \cdot \lambda \ll 1$  [11], где  $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda$  – максимальный размер в системе.

Уравнения Максвелла ( $E_{\varphi} \neq 0, H_{r,z} \neq 0$ ) для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учетом нулевых начальных условий, имеют вид [6-8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_{\varphi}(p, r, z), \quad (1) \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_{\varphi}(p, r, z)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r, z), \quad (2) \\ \frac{\partial E_{\varphi}(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z), \quad (3) \end{array} \right.$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;

$$E_{\varphi}(p, r, z) = L\{E_{\varphi}(t, r, z)\},$$

$$H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\},$$

$$j_\varphi(p, r, z) = L\{j_\varphi(t, r, z)\},$$

$j_\varphi(t, r, z)$  – плотность тока в бифиляре.

Согласно принятым допущениям продольную зависимость  $L$  – изображения плотности тока в бифиляре можно представить косинус разложением Фурье по продольной координате  $-z$  [12]:

$$\left\{ \begin{aligned} g(z) &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cdot \cos(\Omega_n \cdot z), \\ j_\varphi(p, r, z) &= j_m \cdot \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \cdot f(r) \times \\ &\times \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cdot \cos(\Omega_n \cdot z), \\ f(r) &= \begin{cases} 1, r \in [R_1, (R_1 + \Delta)] \cup [R_2, (R_2 + \Delta)] \\ 0, r \notin [R_1, (R_1 + \Delta)] \cup [R_2, (R_2 + \Delta)] \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где  $\Omega_n = \frac{2\pi}{D} \cdot n$ ;

$$\frac{d}{2D}, n = 0,$$

$$a_n^* = \frac{2}{\pi} \cdot \sin \pi \cdot \frac{d}{D}, n = 1, 2, 3, \dots$$

Из дифференциальных уравнений (1 – 3) с учетом выражения (4) в рамках принятых допущений (пренебрегая токами смещения) получим уравнение для азимутальной компоненты напряженности электрического поля  $E_\varphi(p, r, z)$  в выделенных областях

$$\frac{\partial^2 E_\varphi(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) \right) = \mu_0 \cdot p \cdot j_\varphi(p, r, z). \quad (5)$$

С учетом конечности касательной компоненты напряженности электрического поля на оси системы и ее равенства нулю на идеально проводящей внутренней поверхности внешнего индуктора решение уравнения (5) можно записать в виде разложения Фурье – Бесселя [12,13]:

$$E_\varphi(p, r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} E_\varphi(p, m, z) \cdot J_1 \beta_m \cdot \frac{r}{R_3}, \quad (6)$$

где  $E_\varphi(p, r, z)$  – амплитуда разложения,  $J_1 \beta_m \cdot \frac{r}{R_3}$

– функция Бесселя первого порядка;

$\beta_m$  – корни уравнения  $J_1(\beta_m) = 0, m = 1, 2, 3, 4, \dots$

В соответствии с (6) уравнение (5) приводится к обыкновенному линейному дифференциальному уравнению второго порядка относительно функции  $E_\varphi(p, m, z)$  [12]

$$\frac{d^2 E_\varphi(p, m, z)}{dz^2} - \frac{\beta_m^2}{R_3^2} \cdot E_\varphi(p, m, z) = \mu_0 \cdot p \cdot j_m \cdot \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \cdot \frac{2 \cdot F(m, R_{1,2})}{J_2^2(\beta_m)} \times \quad (7)$$

$$\times \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cdot \cos(\Omega_n \cdot z),$$

$$\text{где } F(m, R_{1,2}) = \int_{\beta_m \frac{R_1}{R_3}}^{\beta_m \frac{(R_1+\Delta)}{R_3}} x \cdot J_1(x) \cdot dx - \int_{\beta_m \frac{R_2}{R_3}}^{\beta_m \frac{(R_2+\Delta)}{R_3}} x \cdot J_1(x) \cdot dx.$$

В случае однонаправленных токов в обмотках бифиляра знак перед вторым алгебраическим слагаемым в выражении для  $F(m, R_{1,2})$  меняется на противоположный.

Из уравнения (7) находим, что

$$E_\varphi(p, m, n) = -2p\mu_0 j_m \cdot \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \times \frac{F(m, R_{1,2})}{\Omega_n^2 + \frac{\beta_m^2}{R_3^2} \cdot J_2^2(\beta_m)} \cdot a_n^*. \quad (8)$$

Учитывая (6) и раскрывая ранее принятые обозначения, получаем  $L$  – изображение напряженности возбуждаемого электрического поля

$$E_\varphi(p, r, z) = -2p \cdot \mu_0 \cdot \frac{J_m}{d \cdot \Delta} \cdot \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F(m, R_{1,2})}{\Omega_n^2 + \frac{\beta_m^2}{R_3^2} \cdot J_2^2(\beta_m)} \times \times J_1 \beta_m \frac{r}{R_3} \cdot a_n^* \cdot \cos(\Omega_n z). \quad (9)$$

С помощью уравнения (2) и выражения (9) после обратного преобразования Лапласа находим продольную компоненту напряженности магнитного поля

$$H_z(t, r, z) = 2 \cdot \frac{J_m}{d \cdot \Delta} \cdot \sin(\omega t) \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_m}{R_3} \cdot \frac{F(m, R_{1,2})}{\Omega_n^2 + \frac{\beta_m^2}{R_3^2} \cdot J_2^2(\beta_m)} \times \times J_0 \beta_m \frac{r}{R_3} \cdot a_n^* \cdot \cos(\Omega_n z). \quad (10)$$

В конечном итоге принципиальная действенность бифиляра предполагает вычитание магнитных потоков вне обмоток и их сложение между ними [1,4,5]. В этой связи с помощью выражения (10) вычислим магнитный поток во временном максимуме  $t = \pi/2\omega$  на периоде продольной координаты –

$z \in -\frac{D}{2}, +\frac{D}{2}$  сквозь произвольную поверхность –

$r \in [r_1, r_2]$ .

После необходимых тождественных преобразований получаем, что

$$\Phi(r_1, r_2) = 4\pi\mu_0 \cdot \frac{J_m}{\Delta} \cdot \frac{R_3^3}{D} \times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F(m, R_{1,2}) \cdot G(m, r_{1,2})}{\beta_m^2 \cdot J_2^2(\beta_m)}, \quad (11)$$

где  $G(m, r_{1,2}) = \frac{r_2}{R_3} \cdot J_1 \beta_m \cdot \frac{r_2}{R_3} - \frac{r_1}{R_3} \cdot J_1 \beta_m \cdot \frac{r_1}{R_3}$ .

Аналитические выражения (9-11) представляют собой математические зависимости, с помощью которых можно провести анализ и вычислить основные характеристики электромагнитных процессов в исследованной индукторной системе.

1. Предложена конструкция и получены аналитические пространственно-временные зависимости для напряженностей составляющих вектора возбуждаемого поля и магнитного потока в цилиндрической индукторной системе с внутренним коаксиальным соленоидом, обмотка которого выполнена в виде бифиляра так, что токи в каждой из его жил направлены в противоположные стороны, а результирующее внешнее магнитное поле обращается в нуль.

2. Полученные результаты будут использованы для теоретических исследований и численных оценок с последующим экспериментальным подтверждением практической дееспособности впервые предложенной индукторной системы, а также при конструкторских разработках новых схем оборудования для магнитно-импульсной обработки металлов.

1. Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. Москва: Энергия, 1977. – 88 с.

2. Герасимов В.Г., Кузнецов Э.В., Николаева О.В. Электротехника и электроника. Электрические и магнитные цепи. Москва: Энергоатомиздат, 1996. 288 с.

3. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. Санкт-Петербург: Энергия, 2006. 220 с.

4. Патент 2355060 RU МПК H01F5/00 Катушка / Янчук В.П. (RU). – № 2007111425/09, заявлено 28.03.2007, опубл. 10.05.2009. – 2 с.

5. Патент 3610971 USA МПК H02n11/00. All-Electric motional electric field generator / William J. Hooper (USA). – № 816366, filed 15.04.1969, published 05.10.1971. – 6 p.

6. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / под общей ред. проф. Батыгина Ю.В. Том 1, изд.2-е, перераб. и доп. Харьков: МОСТ–Торнадо, 2003. 284 с.

7. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Springer International Publishing AG (Switzerland), part of Springer Nature, 2018. 94 p.

8. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов : 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1992. 416 с

9. Богач Н.В., Никищенко А.Н. Анализ магнитных полей плоских излучателей. Радиоэлектроника и информатика. Харьков: ХНУРЭ, 2010. № 3. С. 46-50.

10. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Элементы теории и численного расчета электромагнитных процессов в ферромагнитных средах. Киев: Изд. Института электродинамики НАНУ, 1999. 362 с.

11. Landau L.D., Lifshitz E.M., Pitaevsky L.P. Electrodynamics of Continuous Media : Translated from Russian by Sykes J.B., Bell J.B., Kearsley M.J. 2-nd Edition added and enlarged. Reprinted, 2004 (twice). Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House. 620 p.

12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Москва: Наука, 1973. 831 с.

13. Справочник по специальным функциям / под ред. Абрамовица М., Стиган И. Москва: Наука, 1979. 830 с.

## References (transliterated)

1. Volgov V.A. Detali i uzly radiojelektronnoj apparatury [Details and components of electronic equipment]. – Moscow: Jenergija. Publ. 1977. 88 p.

2. Gerasimov V.G., Kuznecov Je.V., Nikolaeva O.V. Jelektrotehnika i jelektronika. Jelektricheskie i magnitnye ceji [Electrical and Electronics. Electrical and magnetic circuits]. Moscow: Jenergoatomizdat. Publ. 1996. 288 p.

3. Atabekov G.I. Osnovy teorii cepej [Fundamentals of circuit theory]. Sankt Petersburg: Jenergija. Publ. 2006. 220 p.

4. Patent 2355060 RU МПК H01F5/00 Katushka [Coil] Janchuk V.P. (RU). – № 2007111425/09, zajavleno 28.03.2007, Publ. 10.05.2009. – 2p.

5. Patent 3610971 USA Int. Cl. H02n11/00. All-Electric motional electric field generator. William J. Hooper (USA). № 816366, filed 15.04.1969, published 05.10.1971. 6 p.

6. Batygin Ju.V., Lavinskij V.I., Himenko L.T. Impul'snye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij [Pulsed magnetic fields for advanced technologies]. – Pod obshej red. prof. Batygina Ju.V.. – Tom1, izd.2-e, pererab. i dop. Kharkiv: MOST–Tornado. Publ. 2003. 284 p.

7. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Springer International Publishing AG (Switzerland), part of Springer Nature, 2018. 94 p.

8. Shneerson G.A. Polja i perehodnye processy v apparature sverh sil'nyh tokov [Fields and transients in the equipment of superstrong currents]. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Jenergoatomizdat. Publ. 1992. 416 p.

9. Bogach N.V., Nikishenko A.N. Analiz magnitnyh polej ploskih izluchatelej [Analysis of magnetic fields of flat emitters]. Radiojelektronika i informatika. Kharkiv: HNURJe. Publ. 2010. No 3. P. 46-50.

10. Podol'cev A.D., Kucherjavaja I.N. Jelementy teorii i chislenogo raschjota jelektromagnitnyh processov v ferromagnitnyh sredah [Elements of the theory and numerical calculation of electromagnetic processes in ferromagnetic media] Kyiv: Izd. Instituta jelektrodinamiki NANU. Publ. 1999. 362 p.

11. Landau L.D., Lifshitz E.M., Pitaevsky L.P. Electrodynamics of Continuous Media : Translated from Russian by Sykes J.B., Bell J.B., Kearsley M.J. 2-nd Edition added and enlarged. Reprinted, 2004 (twice). Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House. 620 p.

12. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike [Math Handbook]. Moscow: Nauka. Publ. 1973. 831 p.

13. Spravochnik po special'nym funkcijam [Handbook of Mathematical Functions]. Pod red. Abramovica M., Stigan I. Moscow: Nauka. Publ. 1979. 830 p.

Поступила (received) 29.05.2019

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

(**Batygin Yuriy Victorovich**) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1278-5621>; e-mail: [yu.v.batygin@gmail.com](mailto:yu.v.batygin@gmail.com).

(**Bondarenko Oleksandr Yuriyovich**) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; доцент кафедри інженерної електрофізики, тел.: (057)7076245; e-mail: [abondarenko51@gmail.com](mailto:abondarenko51@gmail.com).

(**Shinderuk Svitlana Olexandrivna**) – кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6354-4174>; e-mail: [s.shinderuk.2016102@ukr.net](mailto:s.shinderuk.2016102@ukr.net).

(**George Sergeevich Serikov**) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри автомобільної електроніки, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9578-1211>; e-mail: [georgy301212@gmail.com](mailto:georgy301212@gmail.com).

УДК 621.396.96.019.3: 621.391.827(24)

• • • , • • •

Обеспечение электромагнитной совместимости объектов вооружения и военной техники, содержащих в своей основе радио-, электронное и электротехническое оборудование, является обязательным требованием. Важно правильно определить каким стандартам необходимо обеспечить соответствие. В связи со стремлением Украины в НАТО эта задача актуализировалась и конкретизировалась. В 2017 году методом подтверждения приняты национальные нормативные документы, идентичные нормативными документами НАТО, вступившие в силу с 1 февраля 2018. В том числе два стандарта в области электромагнитной совместимости. На основе этих стандартов требуется разработать национальную систему оценки соответствия объектов вооружения и военной техники. Оценка соответствия требованиям стандартов НАТО значительно повысит конкурентную способность образцов национальных производителей на мировом рынке. Проведен анализ системы оценки соответствия, который регламентируется НАТО, с целью имплементации его в Украине. Проведен анализ основных положений этих стандартов и выявлены основанные логические связи стандартов АЕСТР 500 и АЕСТР 250. Приведена классификация вооружений и военной техники, используемая в стандартах НАТО. Рассмотрены номенклатура электромагнитных факторов окружающей среды и методы испытаний для оценки уровней соответствия требованиям электромагнитной совместимости этих объектов.

: стандарты НАТО, объекты вооружения и военной техники, классы оружия, электромагнитная совместимость, испытания, электромагнитные факторы окружающей среды.

• • • , • • •

,

Забезпечення електромагнітної сумісності об'єктів озброєння і військової техніки, що містять у своїй основі радіо-, електронні та електротехнічне обладнання, є обов'язковою вимогою. Важливо правильно визначити яким стандартам необхідно забезпечити відповідність. У зв'язку з прагненням України до НАТО це завдання актуалізувалось та визначилось. У 2017 році методом підтвердження прийняті національні нормативні документи, ідентичні нормативними документами НАТО, набули чинності з 1 лютого 2018. У тому числі два стандарти в галузі електромагнітної сумісності. На основі цих стандартів потрібно розробити національну систему оцінки відповідності об'єктів озброєння і військової техніки. Оцінка відповідності вимогам стандартів НАТО значно підвищить конкурентну здатність зразків національних виробників на світовому ринку. Проведено аналіз системи оцінки відповідності, який регламентується НАТО, з метою імплементації його в Україні. Проведено аналіз основних положень цих стандартів і виявлені засновані логічні зв'язки стандартів АЕСТР 500 і АЕСТР 250. Наведено класифікацію озброєнь і військової техніки, яка використовується в стандартах НАТО. Розглянуто номенклатуру електромагнітних факторів навколишнього середовища і методи випробувань для оцінки рівнів відповідності вимогам електромагнітної сумісності цих об'єктів.

: стандарти НАТО, об'єкти озброєння і військової техніки, класи зброї, електромагнітна сумісність, випробування, електромагнітні фактори навколишнього середовища.

V. V. KNAZIEV, V. I. KRAVCHENKO

## NATO SYSTEM TO ENSURE THE COMPLIANCE OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT WITH THE REQUIREMENTS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

Ensuring the electromagnetic compatibility of weapons and military equipment containing radio, electronic and electrical equipment is a mandatory requirement. It is important to correctly determine which standards need to be consistent. Due to Ukraine's aspirations for NATO, this task was updated and determined. In 2017, the method of confirmation adopted national regulations identical to the NATO regulations, entered into force on February 1, 2018. It including two standards in the field of electromagnetic compatibility. On the basis of these standards, it is necessary to develop a national system for assessing the conformity of weapons and military equipment. Assessing compliance with NATO standards will greatly increase the competitive ability of samples from national producers on the world market. The analysis of conformity assessment system, which is regulated by NATO, is carried out in order to implement it in Ukraine. The analysis of the basic provisions of these standards was carried out and found the logical linkages of the АЕСТР 500 and АЕСТР 250 standards. The classification of armaments and military equipment used in NATO standards is presented. The nomenclature of electromagnetic environmental factors and test methods for assessing the levels of compliance with the requirements of electromagnetic compatibility of these objects are considered.

**Keywords:** NATO standards, weapons and military equipment, weapons classes, electromagnetic compatibility, testing, electromagnetic factors of the environment.

. Принципиально важное значение для реализации Концепции Государственной целевой программы реформирования и развития оборонно-промышленного комплекса Украины на период до 2020 года, которая одобрена Распоряжением КМУ №19-р от 20.01.2016 г., имеет внедрение в Украине стандартов НАТО, в частности по электромагнитной совместимости (ЭМС). Эти стандарты регламентируют требования по параметрам ЭМС к объектам вооружения и военной техники (ОВВТ) и их составных частей с учетом родов войск и назначения. Обеспечение необходимого уровня невосприимчивости образцов ОВВТ к действию мощных электромагнитных помех обуславливает повышение обороноспособности Украины и будет способствовать продвижению продукции национальных производителей на международные рынки.

Приказом Национального органа стандартизации от 26.12.2017 года №471 «О принятии национальных нормативных документов, гармонизированных с нормативными документами НАТО» установлено следующее:

Принять национальные нормативные документы, гармонизированные с нормативными документами НАТО, методом подтверждения как пробные со вступлением в силу с 1 февраля 2018 до 1 февраля 2021. В том числе два стандарта в области ЭМС:

1. ДСТУ-П STANAG 4370 АЕСТР-500 Ed. E: 2017 [1].

2. ДСТУ-П STANAG 4370 АЕСТР-250 Ed. C: 2017 [2].

Следует отметить, что требования указанных стандартов НАТО в значительной степени совпадают с требованиями аналогичных военных стандартов США [3, 4]. Таким образом, реализация испытаний по стандартам НАТО, фактически обеспечит возможность оценки соответствия ОВВТ также требованиям военных стандартов США, которые являются наиболее распространенными в мире.

. Система НАТО по оценке соответствия уровня устойчивости ОВВТ к действию факторов окружающей среды базируется на

комплексе стандартов STANAG 4370, который включает требования по ЭМС объектов, содержащих в своей основе радио-, электронное и электротехническое оборудование, изложенные в стандартах АЕСТР 500 [1] и АЕСТР 250 [2].

АЕСТР 500 регламентирует виды испытаний, уровни испытательных воздействий и методики проведения испытаний для подсистем и оборудования ОВВТ. АЕСТР 500 устанавливает требования к интерфейсам и критериям обеспечения ЭМС ОВВТ воздушных, морских, космических и наземных видов вооружения, включая боеприпасы.

АЕСТР 250 регламентирует воздействия электромагнитных факторов окружающей среды на платформу ОВВТ. Данный стандарт устанавливает обязательную номенклатуру источников электрических и электромагнитных воздействий и определяет характеристики этих воздействий, влияющих на качество функционирования ОВВТ в процессе их эксплуатации. Характеристики и данные, содержащиеся в стандарте АЕСТР 250, предназначены для использования в следующих аспектах:

а) регламентация поставщикам идентифицированного перечня электрических и электромагнитных сред для включения в требования ЭМС при спецификации поставок в войска;

б) задание для поставщиков «стандартных» условий, определенных в требованиях ЭМС на ОВВТ и их применимость к соответствующему операционному сценарию их эксплуатации;

в) помощь инженерам-проектировщикам в составлении электрического / экологического дизайна критериев путем определения всех основных сред эксплуатации ОВВТ, а также иллюстрации и количественной оценки характеристик и параметров, которые влияют на их величину.

Стандарты [1] и [2] являются взаимно дополняющими и предполагают их совместное использование при разработке ОВВТ и приемке, что способствует всеобъемлющему и экономически эффективному выбору видов испытаний на соответствие требованиям ЭМС.

ОВВТ, их системы, подсистемы и оборудование должны отвечать требованиям ЭМС между всеми подсистемами и оборудованием в пределах самой системы и окружающей электромагнитной среды, формируемой внешними электромагнитными источниками, с целью обеспечения их безопасности, правильности эксплуатации и качественного функционирования. Методы обеспечения требований ЭМС радио- и электротехнического оборудования ОВВТ должны поддаваться контролю, проверке на ремонтпригодность и быть эффективными. Контроль должен учитывать все аспекты жизненного цикла системы, включая ее консервацию, упаковку, хранение, погрузку, транспортировку, разгрузку, контроль, запуск, нормальную работу в процессе эксплуатации, и обычные рабочие процедуры, связанные с каждым из перечисленных аспектов.

Обобщенная структурная схема обеспечения требований ЭМС ОВВТ регламентированных стандартами НАТО приведена на рис. 1.

Классы объектов определяются исходя из назначения, состава оборудования и подсистем установленных, или запускаемых с платформ базирования - наземных, морских, подводных, воздушных и космических.

В АЕСТР 500 [1, 508/4 раздел 2.1] ОВВТ разделены на 6 классов:

*Класс оружия А.* Боеприпасы, транспортируемые на самолете и связанные с ними системы, которые базируются на самолете, но не самолет.

*Класс оружия В.* Сухопутные боеприпасы, включая их пусковые и управляющие комплексы.

*Класс оружия С.* Боеприпасы морского базирования и их пусковые платформы, исключая плавсредства, на которых размещены их пусковые установки.



Рис. 1. Обобщенная структурная схема обеспечения требований ЭМС ОВВТ, регламентированных стандартами НАТО

*Класс оружия D1.* Наземные пусковые управляе-

мые ракеты и их управляющие системы.

*Класс оружия D2.* Воздушные пусковые управляемые ракеты и связанные с ними системы, исключая самолет-носитель.

*Класс оружия E.* Не сертифицированные против прямого воздействия боеприпасы, которые должны сохранять работоспособность при непрямым воздействиях. Примерами оружия класса E являются переносные ракетные комплексы и небольшие боеприпасы.

Формально, эта классификация, используется при оценке соответствия уровня устойчивости ОВВТ к действию эффектов, вызванных молнией. Для рассматриваемых классов оружия наиболее опасными элементами, которые чувствительны к действию эффектов молнии, являются электрические взрыватели.

Номенклатура электромагнитных факторов окружающей среды, регламентирована в АЕСТР 250 [2] и содержат следующие виды сред:

*а. Окружающая среда радиочастоты* (Раздел 252). Данный раздел определяет вероятностные характеристики окружающей среды электромагнитного фона в местах приема радиосвязи для типичных сельских и городских районов.

*б. Среда электростатических явлений* (электризация, заряды и разряды) (Раздел 253). В этом разделе описываются электростатические явления и наихудшие варианты электростатических заряда / разряда, которые могут возникать на персонале и летательных аппаратах в полете, а также определены уровни, на которые должны быть испытаны воздушные суда.

*с. Атмосферное электричество и молния* (Раздел 254). Этот раздел описывает характер ударов молнии и статистические уровни параметров, которые соответствуют естественной молнии, а также электромагнитные факторы внешней среды для испытания на воздействие молнии. Одновременно эти параметры определяются вместе с типичным индуцированным током в кабелях систем, поражаемых молнией. Также определены уровни напряженностей электрических и магнитных полей для близких и дальних разрядов молнии.

*д. Постоянный ток и магнитное поле низкой частоты* (Раздел 255). Этот раздел определяет параметры магнитного поля постоянного тока, встречающегося в оперативной среде эксплуатации судна и поля низкой частоты, встречающиеся во всех трех средах его эксплуатации.

*е. Электромагнитный импульс ядерного взрыва* (Раздел 256). Этот раздел описывает феноменологию происхождения электромагнитного импульса ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ), его основные характеристики и методы, с помощью которых он воздействует на ОВВТ и их системы и подсистемы. Также описывается сложный характер формирования ЭМИ ЯВ в аспектах его происхождения, высоты подрыва ядерного заряда, его влияние на оборудование в зависимости от места детонации заряда, мощности заряда, формы генерируемой волны.

f. *Микроволновое излучение высокой мощности* (Раздел 257). В этом разделе описываются типы источников микроволнового излучения большой мощности и общая преднамеренная электромагнитная обстановка и / или ущерб, который она может нанести электронным системам ОБВТ.

g. *Высокочастотная электромагнитная среда* (Раздел 258). В этом разделе представлены высокочастотные электромагнитные источники связи и радиолокационные передающие системы, действие которых определены НАТО и распространяются на наземные, воздушные и космические среды для условий наилучшей эксплуатации.

h. *Внутрисистемная электромагнитная среда. (Качество электропитания)*. (Раздел 259). Этот раздел описывает среды, связанные функционированием ОБВТ, питаемых переменным или постоянным током при их базировании на платформах, имеющих средства коммуникации или вторичные электронные средства питания.

. Испытания ОБВТ по параметрам ЭМС являются критерием определения соответствия этих объектов категориям и требованиям к испытаниям, регламентируемым нормативными документами НАТО. При поставке, проектировании и испытаниях ОБВТ, а также их систем, необходимо определять какие категории и какие виды проверок и испытаний применимы для каждой из этих категорий. Все перечисленные методы не должны применяться без разбора, а скорее должны быть выбраны по условиям необходимости. При разработке программы испытаний необходимо уделять внимание наилучшим из ожидаемых циклов эксплуатации ОБВТ. При этом, совокупный ущерб, причиненный долгосрочной эксплуатацией ОБВТ в различных электромагнитных средах и связанных с ними изменяющихся электромагнитных эффектах должны быть приняты во внимание. Интерфейсы с соответствующими платформами также должны учитываться для обеспечения EMC по АЕСТР-500 [1].

Приведенные далее процедуры обеспечивают оптимальную проверку функционирования изделия и его стойкости к воздействиям внешних электромагнитных сред. Испытания, особенно на уровне оборудования, не обязательно предназначены для дублирования воздействия факторов окружающей среды. В стандарте АЕСТР-500 [1] содержится информация по следующим темам процедуры испытаний:

- a. Разработка программы испытаний.
- b. Применимость каждого вида испытаний.
- c. Методика проведения испытаний.
- d. ВВФ ЭМП для испытаний.
- e. Характеристики испытательных помещений.
- f. Конфигурация испытуемого элемента.
- g. Условия испытаний.
- h. Результаты испытаний, включая планы и отчеты.
- k. Критерии отказа.

. *Внешняя радиочастотная (РЧ) электромагнитная обстановка (ЭМО)*. ОБВТ должны быть электромагнитно совместимы с определенной внешней РЧ ЭМО, вытекающие из их эксплуатационных требований. АЕСТР 250 [2] обеспечивает определение факторов окружающих сред. ОБВТ, подверженные воздействию нескольких определенных ВВФ ЭМП использует наилучший вариант их воздействия. Данное условие должно быть проверено и протестировано на уровне системы, подсистемы оборудования, или их комбинации.

*Испытания и проверка оборудования в целом*. Тестирование и проверка всей системы могут быть применимы к очень крупным системам, которые могут быть испытаны только на месте. Эти требования описывают категории 505, 506, 507 и 508 АЕСТР 500 [1].

*Категории 501-503 АЕСТР 500* [1]. содержат общие процедуры испытаний, которые могут применяться к любым типам ОБВТ на уровне оборудования / подсистемы. Процедуры испытаний для конкретной программы выбираются на основе принципов использования ОБВТ и его эксплуатации в течение всего жизненного цикла.

*Цели программы испытаний*. Основная цель программы испытаний состоит в том, чтобы продемонстрировать, что материальная часть ОБВТ:

- a. Существенно не влияет, не нарушает или не наносит ущерба другим средствам, при их эксплуатации по назначению.
- b. Существенно не влияет, не нарушает или не наносит ущерба его собственным компонентам или оборудования при их работе по назначению.
- c. Существенно не влияет или не подвергает неблагоприятным воздействиям, при эксплуатации во внешних электромагнитных средах, независимо от того, генерируются ли они другими объектами, людьми или природными явлениями.
- d. Не будет существенно подвергаться опасности персонал на этапах цикла функционирования ОБВТ, в результате генерирования собственных электрических или электромагнитных помехи, и неблагоприятных последствий влияния внешних электромагнитных воздействий.

. План программы испытаний ОБВТ по обеспечению требований ЭМС для объекта в целом, включая все компоненты и подсистемы должен быть достаточно подробный, чтобы можно было повторить любой вид испытаний с теми же результатами. План должен охватывать как разработку, так и приемо-сдаточные испытания вплоть до системного тестирования.

План программы ЭМС должен определять:

- a. Структуру управления исполнителем в зависимости от ситуации.
- b. Оборудование, подсистема, система или платформа, которые будут протестированы и график их испытаний.
- c. Характер или цель каждого вида испытаний.

d. Режим (ы) работы тестируемого оборудования.  
 e. Модуляция сигнала, применяемая при тестировании на восприимчивость, по мере необходимости.

f. Функциональные испытания и проверки, которые должны выполняться до, во время и после каждой тестовой / пробной процедуры обеспечения требований ЭМС.

g. Используемый объект (если требуется) и вспомогательное оборудование, необходимое для испытаний. Методы записи данных, включая описание конфигурации тестирования / фотографии, анализ и отчетность.

. Наиболее реалистичным подходом к тестированию материальных средств при моделируемых электромагнитных факторах было бы выставить тестовый элемент в развернутом и функциональном состоянии, в тех условиях, в которых он будет эксплуатироваться (т. е. использование подхода, изложенного в Категориях 505, 506 или 507). Операционная среда эксплуатации объекта определена в АЕСТР-250. Некоторые наземные материальные средства могут быть испытаны с использованием такого подхода.

Воздушные и корабельные системы сложнее развертывать в реальных условиях, поскольку для их испытаний в основном используются наземные испытательные установки. К этим видам относятся пункты испытаний объекта в свободном пространстве - самолет в полете либо находящийся на корабельной палубе или с использованием проводящей заземляющей плоскости, на которой стоит испытываемый объект. Еще труднее проводить испытания типов объектов, которые образуют взаимосвязанные части обширной разветвленной системы или представляют собой объекты, размещенные на или внутри зданий или больших мобильных платформ. Тестирование в естественных окружающих средах (например, испытательные площадки под открытым небом) может быть невозможным для всех этих видов объектов.

ЭМС тестирование подсистем (категория 501, 502 или 503) должно быть выполнено до проведения комплексного тестирования систем (категории 505, 506, 507 или 508). Тестирование интегрированных систем может выявить недостатки, не обнаруженные во время тестирования подсистем.

. Невыполнение одного из нижеперечисленных условий представляет собой несоответствие объекта требованиям ЭМС:

a. Отклонение контролируемого выходного параметра выше уровней требований, установленных в спецификации ЭМС для материальных средств или для ее платформы, систем, подсистем или оборудования, которые составляют их средства.

b. Возникновение переходных явлений или повреждений, которые могут привести к угрозам безопасности, связанной с эксплуатацией ОБВТ.

c. Возникновение переходных явлений или повреждений, которые могут привести к угрозам невы-

полнения запрограммированных задач объекта на определенном этапе его жизненного цикла.

Чтобы инженер-испытатель, при проведении тестирования ОБВТ, мог определить порог их устойчивости (критерий качества функционирования), в методике испытаний должны быть указаны, согласованные в письменной форме, следующие положения.

a. Критерии восприимчивости или допуски на отклонение применяемых характеристик должны быть утверждены Заказчиком применительно к тестовой программе

b. Максимально возможно должны использоваться критерии измеряемых параметров восприимчивости визуальным контролем или проверками в режиме реального времени или пост-тест.

c. Критерии восприимчивости должны быть разработаны для каждого режима работы. Любая потеря этой функции во время тестирования должна быть записана в отчете об испытаниях.

d. Потеря качества функционирования допускается во время каждого теста, если оно может быть восстановлено в ручном режиме органами управления в конце испытания и при этом отсутствуют необратимые отказы. Допустимая потеря качества функционирования должна быть указана в процедуре обеспечения требований ЭМС. Любая такая потеря во время испытаний должна быть записана в отчете. Если пороговый уровень отличается между повышением и понижением сигнала помехи, должен быть записан верхний и нижний пороговые значения (эффект гистерезиса).

Когда вспомогательное контрольное оборудование используется для мониторинга, например, осциллографы или цифровые вольтметры, необходимо предпринять меры для исключения влияния помехи на контролируемый сигнал. Там, где это возможно, должны использоваться оптоволоконные линии передачи информации. Метод, используемый для правильного мониторинга выхода из строя ОБВТ, должен быть подробно описан в отчете по испытаниям. После проведения теста на воздействие кондуктивных помех необходимо проверить, состояние фильтров или других защитных компонентов, которые могут повлиять на результаты других видов испытаний.

Повторное тестирование должно производиться в том случае, если:

a. Ранее испытываемый объект или его оборудование были отремонтированы или переработаны по результатам предыдущего тест-отказа. В этих случаях, когда такие условия могут быть гарантированы, допускается повторная проверка только по тем частям программы испытаний, где произошли сбои.

b. Процедура испытания не выполняется правильно или объект испытания был неправильно настроен. Это включает в себя, вариант, когда испытываемое изделие работает по-разному, что ранее было согласовано с Заказчиком или в тех случаях, когда это соответствует нормальным условиям работы установки. В таких условиях все испытания будут повторяться в правильной конфигурации.

Рассмотрим подробнее раздел 254 стандарта [2]

«Атмосферное электричество и молния».

Стандарт [2] (подраздел 5.3.4) устанавливает, что молниезащита должна проверяться путем анализа во время подтверждения соответствия оборудования, поскольку испытание на уровне системы, в силу больших рисков и стоимости испытаний, не проводится. Следовательно, экспериментальные исследования устойчивости элементов ОБВТ есть основной этап фактического подтверждения уровня устойчивости ОБВТ к дестабилизирующему действию молнии. При этом остается вопрос достаточности полученных экспериментальных результатов для оценки уровня устойчивости комплекса в целом. Обосновать итоговый уровень устойчивости ОБВТ можно только с использованием предварительных расчетных оценок. Сложившаяся система задания требований по стойкости ОБВТ к действию поражающих факторов грозовых разрядов включает в себя наличие нескольких взаимосвязанных уровней задания и конкретизации (уточнения) требований и соответствующих этим уровням задающих документов, которыми руководствуются разработчики ОБВТ и его элементов.

В процессе создания ОБВТ информация о характеристиках грозового воздействия, необходимая для принятия проектных решений (Таблица 1), может

корректироваться и уточняться по мере детализации технического облика объектов проектирования и особенностей их функционирования. Как следствие этого, в описании требований к характеристикам молниестойкости объектов проектирования имеются иерархические уровни. Иначе говоря, реализуется нисходящая схема задания требований по молниестойкости. Указанная схема носит эвристический характер и отражает накопленный опыт в области создания ОБВТ. В соответствии с этой схемой происходит детализация характеристик поражающих факторов молнии, воздействующих на объект и на отдельные его элементы, по мере проработки их технического облика.

Сложным аспектом реализации испытаний является процесс определения требований к тем или иным элементам ОБВТ, путем выбора из многочисленных стандартов, например, [1-12], которые потенциально могут быть применены, особенно, когда требования в разных стандартах отличаются. Потребность в проведении экспертной оценки возникает, также, в случае, когда расчетные значения параметров дестабилизирующего фактора превышают соответствующие значения этого фактора, регламентируемые стандартами.

Таблица 1 – Методы испытаний, регламентируемые АЕСТР-500 [1, табл.504/4–1]

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭФФЕКТОВ	МЕТОД ИСПЫТАНИЯ	
	ВИД ИСПЫТАНИЙ	ССЫЛКИ [1]
ПРЯМЫЕ ЭФФЕКТЫ	Прожиг металла корпуса	Таблица 508/4-C1
	Формирование точки прожига	Таблица 508/4-C2
	Смещение канала по поверхности	Таблица 508/4-C3
	Поверхностное повреждение слоистой непроводящей панели корпуса	Таблица 508/4-C4
	Поверхностное повреждение металлизированной слоистой панели корпуса	Таблица 508/4-C5
	Поверхностное повреждение сотовой непроводящей панели корпуса	Таблица 508/4-C6
	Омический нагрев	Таблица 508/4-C7
	Магнитные силы	Таблица 508/4-C8
	Акустическая ударная волна	Таблица 508/4-C9
НЕПРЯМЫЕ ЭФФЕКТЫ НА ОБЪЕКТ В ЦЕЛОМ	Импульсные испытания	Приложение В, пункт В.7.5 <sup>1)</sup> Уровни в Ref. [1] Приложение В
НЕПРЯМЫЕ ЭФФЕКТЫ НА СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ОБЪЕКТА	Измерения индуцированных напряжений	Приложение В Пункт В.8.9 *
	Испытания на целостность изоляции	Приложение В Пункт В.8.10 *
НЕПРЯМОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОБОРУДОВАНИЕ ОБЪЕКТА	Импульсные испытания	Приложение В Пункт В.3.
	Инжекция синусоидальных затухающих помех	Приложение G Пункт G.5 *
	Инжекция напряжения в систему заземления	Приложение G Пункт G.6 *
	Многократные вспышки, только для классов оружия А и D1	Приложение G Пункт G.6.3 * Форма волны, как на рис. 3 и 4 в Ref. [1]
НЕПРЯМЫЕ ЭФФЕКТЫ НА КОМПЛЕКСЫ (ОРУЖИЕ КЛАССА В)	Отсутствуют общие виды испытаний на молниестойкость для этих эффектов	
ЛИДЕРНАЯ СТАДИЯ МОЛНИИ	Испытания на диэлектрической пробой	Приложение D
ПРЯМЫЕ И НЕПРЯМЫЕ ЭФФЕКТЫ, КОТОРЫЕ МОГУТ ВЛИЯТЬ НА ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА И ТОПЛИВО	См. Таблицу 508 / 4-2	См. Таблицу 508 / 4-2

Примечания: 1. Применимо для случаев близкого удара молнии.  
2. Все ссылки в таблице даны на стандарт [1].

Подход к определению требований для космической техники содержится в специализированном стандарте [5, подраздел 6.48], где указано, что требования по молниестойкости распространяются на все подсистемы и оборудование ракетного комплекса. При определении требований следует учитывать место запуска, системы молниезащиты объекта, расположение оборудования внутри или на транспортном средстве, конструкцию транспортного средства (включая обтекатель полезной нагрузки), возможные условия запуска и другие факторы. Например, все порты оборудования должны быть устойчивы к индуцированным напряжениям. Уровни могут быть адаптированы в зависимости от местоположения и интерфейсов. Например, оборудование с полезной нагрузкой внутри защитного кожуха (металлический обтекатель или другой РЧ-щит) и без внешних интерфейсов может иметь менее строгие уровни. Наиболее детально требования к параметрам прямых и непрямых эффектов молнии разработаны для самолетов гражданской авиации в стандарте RTCA/DO-160G [10]. Поэтому в [5, подраздел 6.48], устойчивость оборудования к действию индуцированных эффектов, сопровождающих молнию (не прямой удар) определяется путем подтверждения соответствия требованиям стандарта RTCA/DO-160G [10, р. 22].

Случай прямого удара регламентируется разделом 23 упомянутого стандарта [10]. Следует отметить особенности испытаний на прямой удар модельной молнии. Для новой конструкции изделия, когда нет достаточных оснований воспользоваться результатами, которые получены для подобных моделей, необходимо определить наиболее вероятные места ударов молнии. Для этого, осуществляются расчетные оценки для реального объекта и экспериментальные исследования на масштабных (уменьшенных) моделях. Критерии выбора масштабной модели находятся в стадии обсуждения. Как правило, масштабная модель выполняется из проводящего материала (металла) как у рассматриваемого изделия, геометрически подобной формы. Геометрические размеры модели определяются размерами рабочего объема экспериментальной установки. Обоснование адекватности такого подхода и величины возможных отличий результатов моделирования при переносе на реальные размеры объекта и параметры натурной молнии строго не обоснованы.

Для более точной оценки уровня наведенных токов и напряжений на гальванических линиях связи рекомендуется использовать метод моделирования процесса протекания тока молнии по обшивке ракеты. В рекомендациях [11, п.6.1.5.4] оценка данных для индуцированных переходных реакций обеспечивается путем измерения передаточных функций относительно входного гармонического тока в точке привязки на самолете. Таким образом, передаточная функция не зависит от составляющей тока молнии. Это может использоваться для определения индуцированной переходной характеристики на проводке самолета путем использования обратного Фурье-преобразования с учетом частотного спектра компонент А, D, D / 2 или Н тока молнии. Очень важно, чтобы данные брались в

достаточном числе точек по частоте, для обеспечения точной характеристики передаточной функции. Эти данные должны быть тщательно отобраны по частоте, чтобы получить передаточную функцию. Как правило, требуется меньшее число точек данных на низкой частоте (от 20 до 50 точек за декаду) где передаточная функция не меняется быстро и требует гораздо больше точек на высоких частотах (от 100 до 200 точек за декаду) в области резонансных частот. Граница между высокой и низкой частотой примерно 1 МГц. Однако, такой метод весьма трудоемкий.

В рекомендациях SAE ARP 5415 [9, п.4.6.2.2] описан метод с использованием «слабых» импульсных токов с формами компонент тока А и Н. При экспериментах используются компонента тока формы А с силой тока в пределах от 500 А до 5000 А, компонента формы Н с силой тока в несколько сотен ампер.

Формально, для объектов наземного базирования параметры молниевых разрядов регламентируются стандартом МЭК 62305-1 [12]. Указанные в этом стандарте параметры отличаются от соответствующих параметров тока молнии, регламентируемых стандартами [1-10]. Однако, это отличие не является принципиальным с точки зрения методов испытаний.

Для наземных подсистем ОБВТ необходимо обеспечить устойчивость к электрическим и магнитным полям, которые создаются близким ударом молнии. Требования к параметрам этих полей содержатся в стандартах [2, 4]. Испытания наиболее актуальны применительно к электрическим взрывателям. Методы реализации в стандартах не регламентируются, более того, указано, что каждое государство должно реализовать свой метод.

Особенности методов молниевых испытаний для полетного состояния, которые могут влиять на параметры молниевых испытаний, таковы:

- высокая скорость движения ракеты, приводящая к существенному изменению конфигурации зон привязки молнии на ее поверхности;
- наличие факела, приводящего к существенному увеличению эффективной длины объекта, что может приводить к иницированию молний.

Указанные особенности необходимо учитывать при осуществлении математического моделирования процесса растекания тока молнии по корпусу ракеты и создания наведенных напряжений и токов на гальванических связях в ракете. Требования стандартов к полетному состоянию не предъявляются. Однако, методы молниевых испытаний для полетного состояния могут быть реализованы аналогично предпусковому, с учетом особенностей формирования разряда молнии.

Рассмотрена структура и содержание основных стандартов НАТО по обеспечению требований электромагнитной совместимости объектов вооружения и военной техники.

Выявлены основанные логические связи между требованиями стандартов АЕСТР 500 [1] и АЕСТР 250 [2]. Представлен алгоритм реализации испытаний устойчивости объектов вооружения и военной техни-

ки к действию электромагнитных факторов, сопровождающих разряд молнии.

Исследования выполнены в рамках научно-исследовательской работы «Розробка системи випробувань типових видів озброєння та військової техніки України за стандартами НАТО з електромагнітної сумісності» (Регистрационный номер 0119U002571), финансируемой Министерством образования и науки Украины.

1. AECTP-500 NATO Standard Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification. Edition E Version 1, December 2016.

2. AECTP-250 NATO Standard Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version1, December 2014.

3. MIL-STD-461G:2015 Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 280 p.

4. MIL-STD-464C:2010 Electromagnetic environmental effects. Requirements for systems. 165 p.

5. ECSS-E-ST-20-07C:2012 Space engineering. Electromagnetic compatibility. ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, the Netherlands. 2012. 91 p.

6. SMC Standard SMC-S-008 Electromagnetic compatibility requirements for space equipment and systems / Space and missile systems center Standard. Air force space command USA, 2008. 123 p.

7. SAE ARP 5412A Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. 56 p.

8. SAE ARP 5414A Aircraft Lightning Zoning. 33 p.

9. SAE ARP 5415 User's Manual for Certification of Aircraft Electrical. Electronic Systems for the Indirect Effects of Lightning. 2002. 22 p.

10. DO-160G/ED-14G:2011 Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. 2011. 438 p.

11. SAE ARP 5416 Aircraft Lightning Test Methods. 2005. 145 p.

12. IEC 62305-1:2011 Protection against lightning – Part 1: General principles.

#### References (transliterated)

1. AECTP-500 NATO Standard Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification. Edition E Version 1, December 2016.

2. AECTP-250 NATO Standard Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version1, December 2014.

3. MIL-STD-461G:2015 Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 280 p.

4. MIL-STD-464C:2010 Electromagnetic environmental effects. Requirements for systems. 165 p.

5. ECSS-E-ST-20-07C:2012 Space engineering. Electromagnetic compatibility. ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, the Netherlands. 2012. 91 p.

6. SMC Standard SMC-S-008 Electromagnetic compatibility requirements for space equipment and systems / Space and missile systems center Standard. Air force space command USA, 2008. 123 p.

7. SAE ARP 5412A Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. 56 p.

8. SAE ARP 5414A Aircraft Lightning Zoning. 33 p.

9. SAE ARP 5415 User's Manual for Certification of Aircraft Electrical. Electronic Systems for the Indirect Effects of Lightning. 2002. 22 p.

10. DO-160G/ED-14G:2011 Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. 2011. 438 p.

11. SAE ARP 5416 Aircraft Lightning Test Methods. 2005. 145 p.

12. IEC 62305-1:2011 Protection against lightning – Part 1: General principles.

Поступила (received) 20.04.2019

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

(**, Kniaziev Volodymyr Volodymyrovych**) кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7119-7790>; e-mail: [knyaz2@i.ua](mailto:knyaz2@i.ua).

(**, Kravchenko Volodymyr Ivanovych**) - доктор технічних наук, професор, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна; e-mail: [tc22@i.ua](mailto:tc22@i.ua).

УДК 621.318

. . . , . . . , . . . , . . .

В работе показано, что генерация колебаний в полупроводниковых структурах технических средств, вызванное воздействием на них внешнего электромагнитного излучения непосредственно связано с затуханием плазмонов и его преобразованием в волны Ван-Кампена, сформулированы граничные условия для функции распределения частиц в потоке, получены выражения для декремента колебаний и построена кинетическая теория взаимодействия поверхностных плазмонов с электронным потоком, пересекающим границу раздела сред. Полученные в работе выражения для декрементов (временных характеристик степени затухания колебаний) позволяют определять мощность их излучения в условиях воздействия внешнего электромагнитного поля. Этот процесс характеризуется искажением рабочих (вольтамперных) характеристик полупроводниковых приборов и оказывает существенное влияние на их электромагнитную совместимость. Получены расчетные соотношения, связывающие величину декремента (инкремента) неустойчивости поверхностных колебаний в полупроводниковых структурах, обусловленные наличием наведенных сторонним электромагнитным излучением токов с параметрами полупроводниковых структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, размерами структуры. Сравнительный анализ существующих экспериментальных и расчетных данных для типичных значений параметров полупроводниковых приборов при воздействии импульсного электромагнитного излучения показывает, что величина энергии излучения (затухания) колебаний определяется одним порядком величины и имеет общие тенденции изменения в зависимости от величин физических параметров комплектующих материалов и воздействующего импульса напряжения.

: электромагнитные поля колебания плазма полупроводник неустойчивость генерация излучение заряженные частицы поверхностные волны

. . . , . . . , . . . , . . .

В роботі показано, що генерація коливань в напівпровідникових структурах технічних засобів, яка викликана впливом на них зовнішнього електромагнітного випромінювання, безпосередньо пов'язана з загасанням плазмонів і його перетворенням в хвилі Ван-Кампена. Сформульовані граничні умови для функції розподілу часток в потоці, отримані вирази для декремента коливань і побудована кінетична теорія взаємодії поверхневих плазмонів з електронним потоком, які перетинають межу розділу середовищ. Отримані в роботі вирази для декрементів (тимчасових характеристик ступеня загасання коливань) дозволяють визначати потужність їх випромінювання в умовах впливу зовнішнього електромагнітного поля. Цей процес характеризується спотворенням робочих (вольтамперних) характеристик напівпровідникових приладів і має суттєвий вплив на їх електромагнітну сумісність. Отримано розрахункові співвідношення, що зв'язують величину декремента (інкремента) нестійкості поверхневих коливань в напівпровідникових структурах, зумовлені наявністю наведених стороннім електромагнітним випромінюванням струмів з параметрами напівпровідникових структур: концентрацією вільних носіїв, діелектричної проникності, розмірами структури. Порівняльний аналіз існуючих експериментальних і розрахункових даних для типових значень параметрів напівпровідникових приладів при впливі імпульсного електромагнітного випромінювання показує, що величина енергії випромінювання (загасання) коливань визначається одним порядком величини і має загальні тенденції зміни в залежності від величин фізичних параметрів комплектуючих матеріалів і діючого імпульса напруги.

: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, нестійкість, генерування, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

**V.V. KNYAZEV, V.I. KRAVCHENKO, L.V. VAVRIV, V.V. YAKOVENKO**

### **INFLUENCE OF MODE OF OSCILLATION GENERATION ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES IN CONDITIONS OF ACTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION**

It is shown in this work that damping of plasmons is caused by their transformation into van Kampen waves, boundary conditions for function of distribution of particles in flow are formulated, expressions for oscillation decrement are obtained and kinetic theory of interaction of surface plasmons with electron flow crossing an interface has been formed. The expressions for decrements (time characteristics of degree of oscillation damping) obtained in the work allow determining power of their radiation in conditions of action of external electromagnetic field. This process is characterized by distortion of performance (volt-ampere) characteristics of semiconduc-

© В.В.Князев, В.И. Кравченко, Л.В. Ваврив, И.В. Яковенко, 2019

tor devices and causes significant influence on their electromagnetic compatibility. Calculated relations connecting the value of decrement (increment) of instability of surface oscillations in semiconductor structures, caused by presence of currents induced by extraneous electromagnetic radiation, with parameters of semiconductor structures: concentration of free carriers, permittivity, structure dimensions have been obtained. Comparative analysis of existing experimental and calculated data for typical values of parameters of semiconductor devices under action of pulsed electromagnetic radiation shows that the value of energy of radiation (attenuation) of oscillations is determined by the same order of the value and has common tendencies of variation depending on the values of physical parameters of component materials and applied voltage pulse.

**Keywords:** electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, instability, generation, radiation, charged particles, surface waves

. Все многообразие отказов (основных характеристик электромагнитной совместимости), возникающих в радиоэлектронной аппаратуре как результат воздействия сторонних факторов, принято разделять на обратимые и необратимые [1]. Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности изделия. Они наступают в случае, когда изменение внутренних параметров аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового пробоя комплектующих). Для обратимых отказов характерна временная утрата работоспособности, приводящая к искажению выходных характеристик [4,5].

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния (ЭМИ) на электрорадиоизделия (ЭРИ) относятся к области необратимых отказов [2]. Вместе с тем, большинство вопросов, связанных с определением степени влияния на рабочие характеристики ЭРИ процессов взаимодействия наведенных ЭМИ токов с собственными электромагнитными колебаниями, протекающих непосредственно в комплектующих ЭРИ, остаются открытыми.

Между тем, именно взаимодействия такого рода определяют степень отклонения выходных характеристик от нормы и возможности восстановления их нормального функционирования, т.е. критерии обратимых отказов.

Настоящая работа компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в твердотельных структурах, используемых в современной СВЧ – электронике, приводящее к изменениям вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов (установлению режима генерации (затухания) колебаний).

. Разработка физической модели возникновения обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия внешнего электромагнитного излучения (влияния наведенных электромагнитным излучением токов на вольтамперные характеристики полупроводниковых приборов). Обоснование адекватности предложенной в работе физической модели возникновения обратимых отказов путем сравнительного анализа существующих экспериментальных и расчетных данных.

. Свойства среды и элект-

ромагнитных колебаний будем описывать системой уравнений (1) – (4) (уравнения Максвелла и материальные уравнения). В дальнейшем, зависимость всех переменных величин, входящих в уравнения (1) – (4), от координат и времени выбираем в виде

$$\vec{E}(x, y, t) = \vec{E}(\omega, q_x, y) \exp[i(q_x x - \omega t)], \quad \omega > 0, \quad q_x > 0.$$

Пусть область  $y < 0$  занимает вакуум (среда 1), а область  $y > 0$  – плазма полупроводника (среда 2). При этом границу раздела сред пересекает поток заряженных частиц, движущихся вдоль положительного направления оси  $y$  со скоростью  $v_0$ . Кинетическая энергия частицы значительно превосходит высоту потенциального барьера на границе. В случае, когда эффектом запаздывания можно пренебречь, свойства среды и электромагнитных колебаний описываются следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + e \vec{E} \frac{\partial f_0}{\partial \vec{p}} = -\nu f; \quad (1)$$

$$\text{rot } \vec{E}(x, y, t) = 0; \quad \text{div } \vec{D} = 4\pi en; \quad e \frac{\partial n}{\partial t} + \text{div } \vec{j} = 0; \quad (2)$$

$$\vec{D}(x, y, t) = \int_{-\infty}^t \hat{\epsilon}(t-t') \vec{E}(x, y, t') dt' \\ \vec{j}(x, y, t) = e \int \vec{v} f(x, y, t, \vec{p}) d\vec{p}, \quad (3)$$

где  $\hat{\epsilon}(t-t')$  – функция отклика, характеризующая электромагнитные свойства среды,  $f_0(\vec{p}) = n_0 \delta(p_x) \delta(p_z) \delta(p_y - p_0)$  – равновесная функция распределения электронов пучка с квадратичным законом дисперсии,  $f$  – малая добавка к функции распределения в возмущенном состоянии,  $\nu$  – эффективная частота столкновения электронов,  $n, \vec{v}$  – их концентрация и скорость,  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля.

Тогда

$$\vec{D}(\omega, q_x, y) = \epsilon(\omega) \vec{E}(\omega, q_x, y), \quad (4)$$

$$\epsilon(\omega) = \int_0^{\infty} \hat{\epsilon}(t) \exp(i\omega t) dt - \text{диэлектрическая проницае-}$$

мость среды. Предполагая, что  $\epsilon(\omega) = \epsilon_0 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$ , где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная решетки,  $\omega_0$  – ленгмюровская частота электронов проводимости среды, а  $\omega > 0; q_x > 0$ . Решение кинетического уравнения (1)

можно представить в виде:

$$f = -\frac{e}{v_y} \int_c^y \bar{E} \frac{\partial f_0}{\partial p} \exp \frac{i\tilde{\omega}}{v_y} (y-y') dy'; \quad (5)$$

$$\tilde{\omega} = \omega - q_x v_x + i\nu; \quad v_y > 0$$

Неопределенная константа  $C$  находится из граничных условий. Поскольку при  $y \rightarrow -\infty$  функция распределения должна быть ограничена, то  $C = -\infty$ . Поэтому в области  $y \leq 0$  получим:

$$f_1 = -\frac{e}{v_y} \int_{-\infty}^y \bar{E}_1 \frac{\partial f_0}{\partial p} \exp \frac{i\tilde{\omega}}{v_y} (y-y') dy'. \quad (6)$$

В случае слабой пространственной дисперсии выражение (6) можно упростить, воспользовавшись неравенством  $\omega \gg q_x v_x$ ,  $l\omega/v_0 \gg 1$ ,  $l$  – глубина проникновения поля в среду. Произведя замену переменных  $y' = y = z$  и разлагая  $\bar{E}(y+z)$  в ряд по  $z$ , получим:

$$f_1(y) = \frac{e\bar{E}_1(y)}{i\omega} \frac{\partial f_0}{\partial p}; \quad \omega \gg \nu. \quad (7)$$

Чтобы найти  $C$  в области  $y > 0$ , сформулируем условие на поверхности  $y = 0$ . Полагая, что число частиц, падающих на границу, равно числу частиц, прошедших в среду 2, можно записать:

$$f_1(y=0) = f_2(y=0). \quad (8)$$

Отсюда находим:

$$f_2(y) = \frac{e}{i\omega} \frac{\partial f_0}{\partial p} \bar{E}_2(y) + \bar{F}(y) \exp \frac{i\omega^*}{v_y} y, \quad (9)$$

$$\omega^* = \omega + i\nu,$$

где  $\bar{F}(y) = \bar{E}_1(0) - \bar{E}_2(y)$ .

Второе слагаемое описывает волны Ван-Кампена, возбуждаемые вблизи границы в среде 2. Электрическая индукция

$\bar{D}(\omega, q_x, y) = \varepsilon(\omega)\bar{E}(\omega, q_x, y) + \frac{4\pi i}{\omega} \bar{j}(\omega, q_x, y)$  в средах 1, 2 приобретает следующий вид:

$$\bar{D}_1(\omega, q_x, y) = \varepsilon_1(\omega)\bar{E}_1(\omega, q_x, y); \quad (10)$$

$$\bar{D}_2(\omega, q_x, y) = \varepsilon_2(\omega)\bar{E}_2(\omega, q_x, y) + \frac{4\pi e^2}{\omega^2} \int v \frac{\partial f_0}{\partial p} \bar{F}(y) \exp i \frac{\omega^*}{v_y} y d\bar{p}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon_1(\omega) = 1 - \omega_b^2/\omega^2$ ,  $\varepsilon_2(\omega) = \varepsilon(\omega) - \omega_b^2/\omega^2$ ,  $\omega_b$  – ленгмюровская частота электронов пучка.

Система уравнений (1) – (4) для каждой из сред преобразуется к уравнениям [5,6]:

$$\frac{\partial^2 E_{x1}}{\partial y^2} - q_x^2 E_{x1} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 E_{x2}}{\partial y^2} - q_x^2 E_{x2} = \frac{4\pi e^2 q_x F_y}{\omega \varepsilon_2(\omega)} \int \frac{\partial f_0}{\partial p_y} \exp \frac{i\omega^*}{v_y} y dp_y. \quad (13)$$

В среде 1 выражения для полей приобретают вид:

$$E_{x1} = A_1 \exp(q_x y); \quad E_{y1} = -iE_{x1}. \quad (14)$$

Уравнение (13) решаем методом последовательных приближений, полагая, что концентрация электронов пучка много меньше концентрации электронов среды:  $\omega_0 \gg \omega_b$ . Тогда  $E_{x2}$  принимает вид:

$$E_{x2} = A_2 \exp(-q_x y) + \frac{4\pi e^2 q_x (A_1 + A_2 \exp(-q_x y))}{\omega^3 \varepsilon_2(\omega)} \int v_y^2 \frac{f_0}{\partial p_y} \exp \frac{i\omega^*}{v_y} y dp_y, \quad (15)$$

где  $\varepsilon(\omega) \neq 0$ .

Нормальная составляющая вектора электрической индукции оказывается равной:

$$D_y = i\varepsilon_2(\omega)A_2 \exp(-q_x y). \quad (16)$$

Воспользовавшись далее условием непрерывности нормальных составляющих  $\bar{D}$  и тангенциальных составляющих  $\bar{E}$  на границе раздела сред  $y = 0$ , находим следующее дисперсионное уравнение для поверхностных плазмонов:

$$\frac{1 + \varepsilon(\omega)}{1 - \varepsilon(\omega)} = \frac{2i\omega_b^2 q_x v_0}{\omega^3 \varepsilon(\omega)}. \quad (17)$$

Принимая во внимание малость правой части выражения (17), определим собственную частоту поверхностных плазмонов и их декремент:

$$\omega_3 = \frac{\omega_0}{\sqrt{\varepsilon_0 + 1}} - \frac{2i\omega_b^2}{\omega_0^2} q_x v_0. \quad (18)$$

Таким образом, затухание поверхностных плазмонов обусловлено их преобразованием в волны малой плотности частиц – волны Ван-Кампена, возбуждаемые вблизи границы раздела. Сравнение формулы (17) с результатами [3], показывают, что в гидродинамическом приближении для получения величины декремента необходимо в среде 2 учитывать в потоке частиц две волны пространственного заряда, убывающие и нарастающие при  $y \rightarrow \infty$ . При этом на границе, кроме обычных электродинамических условий для полей, должны выполняться два дополнительных условия: непрерывность потока частиц и потока импульса частицы через границу [7].

Если же в гидродинамическом приближении учитывать только убывающие от границы волны пространственного заряда с условием непрерывности нормальной составляющей потока частиц на границе (поток импульса частиц разрывен), то декремент плазмонов оказывается в два раза меньше, чем в формуле (18).

Ясно, что кинетическое описание взаимодействия плазмонов с потоком частиц через волны Ван-Кампена является более рациональным и корректным,

поскольку все величины являются конечными при  $y \rightarrow \infty$  и используется только одно дополнительное граничное условие.

В заключение рассмотрим взаимодействие поверхностных плазмонов с потоком частиц при их упругом отражении от границы (бесконечно высокий потенциальный барьер).

Обозначим  $f_0^\pm(\vec{p}) = n_0 \delta(p_x) \delta(p_y \mp p_0) \delta(p_z)$  функции распределения частиц, падающих ( $p_y > 0$ ) и отраженных ( $p_y < 0$ ) от границы раздела и соответственно через  $f^\pm$  возмущенные добавки к ним. Каждая из этих функций, естественно, удовлетворяет кинетическому уравнению (3.4). В результате решения этих уравнений в приближении слабой пространственной дисперсии и выполнения граничных условий

$$f^+(p_x, p_y, p_z, y=0) = f^-(p_x, -p_y, p_z, y=0) \quad (19)$$

получим:

$$f^+(\vec{p}, y) = \frac{e\bar{E}_1(y)}{i\omega} \frac{\partial f_0^+(\vec{p})}{\partial \vec{p}}; \quad (20)$$

$$f^-(\vec{p}, y) = \frac{e}{i\omega} \bar{E}_1(y) \frac{\partial f_0^-(\vec{p})}{\partial \vec{p}} - C(\vec{p}, y) \exp \frac{i\omega^* y}{v_y};$$

$$C(\vec{p}, y) = \frac{e}{i\omega} \times \bar{E}_1(y) \frac{\partial f_0^-(\vec{p})}{\partial \vec{p}} + E_{y1}(0) \frac{\partial f_0^-(-p_y)}{\partial p_y} - E_{x1}(0) \frac{\partial f_0^-(-p_y)}{\partial p_x} \quad (21)$$

Уравнение (12) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial^2 E_{x1}}{\partial y^2} - q_x^2 E_{x1} = \frac{4\pi e q_x}{\varepsilon_1(\omega)} \int_{v_y > 0} C(\vec{p}, y) \exp \frac{i\omega^* y}{v_y} d\vec{p} \quad (22)$$

Из уравнений (21) – (22) следует:

$$E_{x1}(\omega, q_x, y) = A_1 [\exp(q_x, y) + \frac{8\pi e^2 q_x}{\omega^3 \varepsilon_1(\omega)} \int_{v_y^2} \frac{\partial f_0^-(\vec{p})}{\partial p_y} \exp \frac{i\omega^* y}{v_y} dp_y] \quad (23)$$

Электрическая индукция в среде 1:

$$D_{y1}(\omega, q_x, y) = \varepsilon_1(\omega) \times E_{y1}(\omega, q_x, y) + \frac{4\pi e}{\omega} \int_{v_y} f^-(\vec{p}, y) d\vec{p}$$

при  $\omega^2 \gg \omega_b^2$  оказалась равной  $-iA_1 \exp(q_x, y)$ . Правая часть уравнения (13) в этом случае равна нулю и поле в среде 2 запишется:

$$E_{x2} = A_2 \exp(-q_x, y); \quad E_{y2} = iE_{x2} \quad (24)$$

Видно, что декремент поверхностных плазмонов остается одним и тем же, как при бесконечно большом потенциальном барьере, так и бесконечно малом по сравнению с кинетической энергией частицы.

При воздействии стороннего ЭМИ над границей диэлектрик – полупроводник движется поток заря-

женных частиц, распределение которых в импульсном пространстве описывается функцией:

$$f(\vec{p}) = n_{0b} \delta(p_x - p_0) \delta(p_z) \delta(p_y); \quad p_0 = mv_0 \quad (25)$$

Чтобы оценить величину потерь энергии потока частиц на возбуждение поверхностных колебаний необходимо провести суммирование по всем скоростям частиц.

Воспользовавшись граничными условиями для поля и электрической индукции, находим:

$$1 + \varepsilon(\omega) = -\frac{4i\omega_b^2 q_x y}{\omega^3} \quad (26)$$

Сравнительный анализ существующих экспериментальных [8, 11] и расчетных данных, полученных на основе соотношения (18) для типичных значений параметров полупроводниковых приборов [2], при воздействии ЭМИ (амплитуда напряженности электрического поля  $E < 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ , длительность импульса

$\Delta t_{\text{имп}} \approx 10^2 - 10^3 \text{ нс}$ ). показывает, что величина энергии излучения (затухания) колебаний определяется одним порядком величины  $\Delta W_{\text{изл}} \approx 10^{-7} - 10^{-9} \text{ Дж}$  и имеет общие тенденции изменения в зависимости от величин физических параметров комплектующих материалов и воздействующего импульса напряжения.

Получены расчетные соотношения, связывающие величину декремента (инкремента) неустойчивости поверхностных колебаний в полупроводниковых структурах, обусловленные наличием наведенных сторонним электромагнитным излучением токов с параметрами полупроводниковых структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, размерами структуры.

Предложена модель взаимодействия наведенных внешним ЭМИ токов с электростатическими колебаниями структуры диэлектрик – полупроводник, показано что затухание поверхностных плазмонов обусловлено их преобразованием в волны малой плотности частиц - волны Ван-Кампена, возбуждаемые вблизи границы раздела.

Обоснована адекватность предложенной в работе физической модели возникновения обратимых отказов (влияния наведенных электромагнитным излучением токов на вольтамперные характеристики полупроводниковых приборов). Определены области параметров внешнего электромагнитного излучения, при которых реализуется данная физическая модель (амплитуда напряженности электрического поля  $E < 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ , дли-

тельность импульса  $\Delta t_{\text{имп}} \approx 10^2 - 10^3 \text{ нс}$ ).

Результаты сравнительного анализа полученных в настоящей работе экспериментальных и расчетных данных позволяют использовать предложенную физическую модель обратимых отказов и полученные на ее основе расчетные соотношения для определения кри-

териев возникновения и количественных характеристик обратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях воздействия импульсного электромагнитного излучения. (появлению S –образных участков прямого тока).

1. Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда В.М., Яковенко В.М. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. Киев: Наукова думка, 1991. 216 с.

2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Москва: Мир, 1984. 456 с.

3. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. Москва: Радио и связь, 1979. 225 с.

4. Стил М., Вюраль Б. Взаимодействие волн в плазме твердого тела. Москва: Атомиздат, 1973. 312 с.

5. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. Москва: Радио и связь, 1988. 235 с.

6. Кравченко В.И., Яковенко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2009. № 11. С. 62-69.

7. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2012. № 21. С.154-161.

8. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2012. № 21. С. 161-169.

9. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих электрорадиоизделий. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2013. № 27. С. 83-89.

10. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2013. № 27. С. 96 -103.

11. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2013. № 27. С.103-111.

## References (transliterated)

1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jeletromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah [Electromagnetic phenomena of the microwave range in inhomogeneous semiconductor structures]. Kyiv: Naukova dumka. 1991. 216 p.

2. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov [Physics of semiconductor devices]. Moscow: Mir. 1984. 456 p.

3. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jeletromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p.

4. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela [Electromagnetic influences on communications structures]. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.

5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jeletromagnitnym izluchenijam [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing electromagnetic radiation]. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p.

6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jeletroradioizdelij [Influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2009. No 11. P. 62-69.

7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jeletromagnitnyh kolebanij v 2-D jeletronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2012. № 21. P.154-161.

8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jeletromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jeletromagnitnogo vozdejstvija [Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2012. No 21. P. 161-169.

9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhenykh chastic. Navedennogo vneshnim jeletromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jeletroradioizdelij [Influence of the flow of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation, on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 83-89.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jeletroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija [Attenuation of surface oscillations of semiconductor structures of electronic products under conditions of exposure to external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 96-103.

11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jeletronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija [Kinetic mechanisms of interaction of surface oscillations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 103-111.

Поступила (received) 27.04.2019.

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

(**, Kniaziev Volodymyr**) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID 0000-0002-7119-7790; e-mail: knyaz2@i.ua.

(**, Kravchenko Volodymyr Ivanovych**) - доктор технічних наук, професор, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна; e-mail: tc22@i.ua.

(**, Yakovenko Igor Vladimirovich**) – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри Системи інформації Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна ; тел. (057) 707 66 18; e-mail: yakovenko60IV@ukr.net

(**, Vavriv Ljudmila Vladislavovna**) – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник; м. Харків, Україна, тел.: (057) 707-63-09; e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

УДК 621.318

• • • , • • • , • • • , • • •

Определены механизмы появления неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых структур, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях. Изучены механизмы затухания поверхностных плазмонов в условиях, когда температура носителей проводящих твердых тел много меньше энергии плазмона (квантовое приближение). Получены выражения для декрементов поверхностных плазмонов при наличии бесконечно высокого и бесконечно малого потенциального барьера на границе раздела сред. Исследованы процессы затухания поверхностных колебаний, когда взаимодействие волн и частиц носит характер случайных столкновений и описывается методом вторичного квантования системы (представление чисел заполнения). Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа поверхностных плазмонов в результате их взаимодействия с электронами проводимости; приведены его решения, определяющие декремент колебаний и мощность спонтанного излучения частиц. Обоснована физическая модель возникновения обратимых отказов (влияния наведенных электромагнитным излучением токов на вольт - амперные характеристики полупроводниковых приборов). Определены области параметров внешнего электромагнитного излучения, при которых реализуется данная физическая модель.

: електромагнітні поля, коливання плазми, напівпровідник, нестійкість, генерація, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

• • • , • • • , • • • , • • •

Визначено механізми появи нестійкостей власних коливань напівпровідникових структур, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання. Показано, що вплив імпульсного електромагнітного випромінювання супроводжується виникненням струмів в провідних елементах виробів і виникненням їх внутрішніх полів. Розроблено теорію беззіткульовального загасання поверхневих поляритонів в квантовому і класичному наближеннях. Вивчено механізми загасання поверхневих плазмонів в умовах, коли температура носіїв провідних твердих тіл багато менше енергії плазмона (квантове наближення). Отримані вирази для декрементів поверхневих плазмонів при наявності нескінченно високого і нескінченно малого потенційного бар'єру на межі поділу середовищ. Досліджено процеси загасання поверхневих коливань, коли взаємодія хвиль і частинок носить характер випадкових зіткнень і описується методом вторинного квантування системи (подання чисел заповнення). Отримано кінетичне рівняння, що описує зміну числа поверхневих плазмонів в результаті їх взаємодії з електронами провідності; наведені його рішення, що визначають декремент коливань і потужність спонтанного випромінювання частинок. Обґрунтована фізична модель виникнення зворотних

відмов (впливу наведених електромагнітним випромінюванням струмів на вольт-амперні характеристики напівпровідникових приладів). Визначено області параметрів зовнішнього електромагнітного випромінювання, при яких реалізується дана фізична модель.

: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, нестійкість, генерація, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

V.V. KNYAZEV, V.I. KRAVCHENKO, L.V. VAVRIV, V.V. YAKOVENKO

## PHYSICS OF REVERSIBLE FAILURES OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES UNDER ACTION OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE

Mechanisms of occurrence of instabilities of natural oscillations of semiconductor structures, caused by their interaction with fluxes of charged particles in conditions of influence of external electromagnetic radiation are determined. It is shown that influence of pulsed electromagnetic radiation is accompanied by occurrence of currents in conducting elements of articles and by advent of their internal fields. The theory of collisionless damping of surface polaritons in quantum and classic approximations has been developed. Mechanisms of damping of surface plasmons have been studied in conditions when temperature of carriers of conducting rigid body is much lower than plasmon energy (quantum approximation). Expressions for decrements of surface plasmons in presence of infinitely high and infinitely low potential barrier at interface were obtained. The processes of damping of surface oscillations when interaction of waves and particles has character of random collisions and is described by method of secondary quantization of system (occupation number representation) were investigated. Kinetic equation describing change of the number of surface plasmons as a result of their interaction with conduction electrons was obtained; its solutions determining decrement of oscillations and power of spontaneous radiation of particles are presented. Physical model of origin of reversible failures (of influence of currents induced by electromagnetic radiation on volt-ampere characteristics of semiconductor devices) was substantiated. Domains of parameters of external electromagnetic radiation, for those this physical model is realized, were determined.

**Key words:** electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, instability, generation, radiation, charged particles, surface waves.

. Одним из важным требований электромагнитной совместимости технических средств является оценка уровня устойчивости к действию сторонних электромагнитных помех, которые могут распространяться по гальваническим связям в виде токов и напряжений, а также, в окружающем пространстве в виде электромагнитных полей [1,2]. Для технических средств, предназначенных выполнять особо ответственные функции (например, систем управления безопасностью реакторов на АЭС; бортового оборудования летательных аппаратов; систем управления ракетными комплексами), устанавливается критерий функционирования А, который означает, что техническое средство должно функционировать без отклонения в том числе при действии электромагнитной помехи. Результаты большого числа проведенных в нашем институте испытаний уровня устойчивости технических средств, показывают, что наиболее частым является отклонение качества функционирования по критерию В, когда в процессе воздействия характеристики технического средства выходят за допустимые пределы, но при завершении процесса воздействия возвращаются к нормальному функционированию. Такой вид несоответствия относится к обратимым отказам [3-5]. Причины возникновения обратимых отказов чаще всего связаны с отклонением параметров электронных компонент. Принципиально важно для устранения этих отказов понимать физические основы их появления. Некоторые аспекты проблемы рассмотрены в рамках данной статьи.

Современная технология позволяет создавать проводящие твердотельные структуры: пленки, полупроводники со сверхрешеткой и двумерным (2D) электронным газом, а также структуры типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) и т.п. При определении механизмов формирования ультратонких слоев

является важным изучение их электронных свойств и плазменных колебаний, обусловленных коллективным поведением зарядов. Достаточно важным также для диагностики и практического использования ультратонких слоев (например, микро- и наноэлектроника) являются вопросы взаимодействия плазменных колебаний с потоками заряженных частиц [ 6 ].

Электромагнитные колебания субмиллиметрового и коротковолновой части миллиметрового диапазонов могут оказывать существенное влияние на работоспособность полупроводниковых приборов при воздействии внешних электромагнитных полей, поскольку режим генерации искажает вольт-амперные характеристики электронных элементов [7].

Настоящая работа относится к области исследований обратимых отказов. В ней исследуются процессы затухания поверхностных колебаний, когда взаимодействие волн и заряженных частиц, наведенных внешним излучением, носит характер случайных столкновений и описывается методом вторичного квантования системы. Подобное взаимодействие волн и частиц является одним из механизмов возникновения обратимых отказов.

. Для нахождения спектра и декрементов затухания поверхностных колебаний на границе двух полубесконечных сред в условиях пренебрежения эффектом запаздывания электромагнитного поля воспользуемся следующими уравнениями [6].

$$\begin{aligned} & \left( \right) \\ & \text{rot } \vec{E}(x, y, t) = 0; \quad \vec{E}(x, y, t) = \vec{E}(\omega, q_x, y) e^{i(q_x x - \omega t)}; \\ & \vec{E}(\omega, q_x, y) = (E_x, E_y, 0); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{D}(\omega, x, y) &= 0; \\ \vec{D}(\omega, x, y) &= \varepsilon_0(y) \vec{E}(\omega, x, y) + \frac{4\pi i}{\omega} \vec{j}(\omega, x, y); \\ \varepsilon_0(y) &= \begin{cases} \varepsilon_{01}, & y > 0; \\ \varepsilon_{02}, & y < 0; \end{cases} \quad \vec{E} = \begin{cases} \vec{E}_1, & y > 0; \\ \vec{E}_2, & y < 0; \end{cases} \\ \vec{j} &= \begin{cases} \vec{j}_1, & y > 0; \\ \vec{j}_2, & y < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

с граничными условиями при  $y = 0$ : непрерывностью тангенциальных составляющих электрического поля  $E_x$  и нормальных составляющих электрической индукции  $D_y$ .

Объектом исследования является поверхностные колебания полупроводниковых структур, входящих в состав электронных изделий и механизмы их взаимодействия с электронами проводимости, приводящие к затуханию колебаний в условиях воздействия внешнего электромагнитного поля.

Рассмотрим затухание поверхностных плазмонов на границе двух сред, которые при  $T = 0$  характеризуются диэлектрическими проницаемостями [7]

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}.$$

Если среды разделены бесконечно высоким потенциальным барьером  $\omega_{01} \neq \omega_{02}$ , то частицы испытывают с обеих сторон упругое (зеркальное) отражение от барьера, а электромагнитные свойства такой полуграниченной среды, как известно, идентичны свойствам безграничной. При этом результаты, полученные в [8] в классическом приближении для границы плазма-диэлектрик (непоглощающая среда), могут быть перенесены на случай двух плазмopodobных сред, разделенных слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с длиной волны.

Мы будем исходить из модели однородной среды. Иными словами, будем считать, как и в случае холодной плазмы, обе среды безграничными, а поля и токи в каждой из них удовлетворяют граничным условиям на плоскости  $y = 0$  и убывают при  $y \rightarrow \pm\infty$ . Очевидно, что такая модель вполне оправдана, если граница является прозрачной для частиц, т.е. высота потенциального барьера мала по сравнению с энергией частиц. При этом  $\omega_{01} = \omega_{02}$ ;  $\varepsilon_{01} \neq \varepsilon_{02}$ .

Тогда материальное уравнение можно записать:

$$\vec{j}(\omega, \vec{r}) = -\frac{e^2 n_0}{mc} \vec{A}(\omega, r) + \vec{j}'(\omega, r). \quad (3)$$

Здесь  $\vec{A}(\omega, \vec{r}) = \frac{c}{i\omega} \vec{E}(\omega, \vec{r})$  – вектор-потенциал,  $n_0 = \sum \rho_k^0 \psi_k^*(\vec{r}) \psi_k(\vec{r})$  – равновесная концентрация носителей заряда,  $\rho_k^0$  их равновесная функция распределения,  $\psi_k(\vec{r}) = V^{-1/2} \exp(ik\vec{r})$  – волновая функция

частицы с законом дисперсии  $E_k = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ ,  $V$  – объем среды,  $\vec{j}'(\omega, \vec{r}) = \sum \rho_{kk'}(\omega) \vec{j}_{kk'}(\vec{r})$  – ток проводимости, обусловленный переходами электронов между состояниями  $k$  и  $k'$  ( $k_z = k'_z$ ) вследствие их неупругого рассеяния на потенциале  $\vec{A}(\omega, \vec{r}) = \vec{A}(\omega, q_x, y) e^{i(q_x x - \omega t)}$  (далее полагаем для определенности  $q_x > 0$ ;  $\omega > 0$ ),  $\rho_{kk'}^0(\omega)$  – возмущенная недиагональная поправка к равновесной функции распределения частиц, определяемая из уравнения движения для матрицы плотности [9]:

$$\rho_{kk'}(\omega) = \frac{\rho_k^0 - \rho_{k'}^0}{\hbar(\omega_{kk'} - \omega^*)} H_{kk'}(\omega); \quad \omega_{kk'} = \frac{\hbar(k^2 - k'^2)}{2m}; \quad (4)$$

$$\omega^* = \omega + i\nu; \quad \nu \rightarrow 0,$$

$$H_{kk'} = \frac{ie\hbar}{2mc} \int \psi_k^*(\vec{r}) (\vec{A} \nabla + \nabla \vec{A}) \psi_{k'}(\vec{r}) d\vec{r}$$

– матричный элемент гамильтониана взаимодействия носителей заряда с электромагнитным полем

$$\vec{j}_{kk'} = \frac{ie\hbar}{2m} \left\{ \nabla \psi_{k'}^*(r) \psi_k(\vec{r}) - \psi_{k'}^*(r) \nabla \psi_k(\vec{r}) \right\} \quad (5)$$

– матричный элемент оператора плотности тока частицы. Окончательно  $\vec{j}'(\omega, \vec{r})$  можно преобразовать к следующему виду:

$$\begin{aligned} \vec{j}'(\omega, \vec{r}) &= -\frac{1}{\hbar c} \sum \vec{j}_{kk'}(\vec{r}) \frac{(\rho_k^0 - \rho_{k'}^0)}{\omega_{kk'} - \omega^*} \times \\ &\times \left[ H_{kk'}^s(\omega) + \int \vec{j}_{kk'}(\vec{r}) \vec{A}(\omega, \vec{r}) d\vec{r} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

где  $H_{kk'}^s = \frac{ie\hbar}{2mc} \int dx dz \psi_k^*(x, 0, z) \psi_{k'}(x, 0, z) [A_y(\omega, x, +0) - A_y(\omega, x, -0)]$ .

Таким образом, в выражении (3) для полного тока первое слагаемое определяет частоту поверхностных плазмонов, второе слагаемое должно определять их затухание.

Подставляя далее  $\vec{j}(\omega, \vec{r})$  в уравнение (2) и принимая во внимание уравнение (3), получим:

$$\frac{\partial^2 A_x(\omega, x, y)}{\partial y^2} - q_x^2 A_x(\omega, x, y) = -\frac{4\pi q_x c}{\omega^2 \varepsilon(\omega)} \operatorname{div} \vec{j}'(\omega, x, y), \quad (7)$$

где

$$\varepsilon(\omega) = \begin{cases} \varepsilon_1(\omega), & y > 0; \\ \varepsilon_2(\omega), & y < 0. \end{cases}$$

Поскольку декремент затухания мал по сравнению с частотой колебаний, то решение уравнения (7) будем искать методом последовательных приближений. Полагая в первом приближении правую часть равной нулю, находим при  $\varepsilon(\omega) \neq 0$  следующие выражения для потенциала в каждой из сред

$$\begin{aligned} y > 0, \quad A_{1x}(y) &= A_1 e^{-q_x y}, \quad A_{1y} = iA_{1x}(y); \\ y < 0, \quad A_{2x}(y) &= A_2 e^{-q_x y}, \quad A_{2y} = -iA_{2x}(y). \end{aligned} \quad (8)$$

Продолжим потенциалы соответственно на полу-пространства

$$y < 0 \text{ и } y > 0: A_x(-y) = A_x(y); \quad A_y(-y) = -A_y(y).$$

При этом нормальная составляющая  $\vec{A}(y)$  испыты-вает разрыв на плоскости  $y = 0$ . Подставляя значе-ния  $\vec{A}(\omega, \vec{r})$  в формулу (3) и интегрируя по всему про-странству  $\vec{r}$ , получаем после замены суммирования  $\Sigma_k$  на интегрирование  $\frac{V}{(2\pi)^3} \int d\vec{k}$ .

$$\begin{aligned} \vec{j}'(\omega, \vec{r}) &= \frac{e^2 \hbar A e^{iq_x x}}{2(2\pi)^4 m^2 c} \int \frac{d\vec{k} dk'_y}{\omega_{kk'} - \omega} (\rho_k^0 - \rho_{k'}^0) (\vec{k} + \vec{k}') \times \\ &\times \left[ 1 - \frac{k^2 - k'^2}{q_x^2 + (k_y - k'_y)^2} e^{i(k_y - k'_y)y} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь  $k'_x = k_x - q_x, \quad k'_z = k_z$ .

Слагаемое, пропорциональное  $\rho_k^0$ , определяет ток, возникающий в результате перехода электрона из состояния  $k$  в состояние  $k'$  с излучением кванта  $\hbar\omega$  электромагнитного поля. При этом можно провести интегрирование по  $k'_y$ , учитывая при  $k_x \gg q_x, \quad \omega \gg q_x v_x$  вклады полюсов  $k_y'^2 = k_y^2 - \frac{2m(\omega + i\nu)}{\hbar}$ .

Слагаемое с  $\rho_{k'}^0$  обуславливает ток, связанный с переходами электронов из состояния  $k'$  в состояние  $k$  при поглощении энергии  $\hbar\omega$ . Этот ток определяется полюсами  $k_y^2 = k_y'^2 + \frac{2m(\omega + i\nu)}{\hbar}$  при интегрировании по  $k_y$ . В результате интегрирования получаем:

$$\begin{aligned} \vec{j}'(\omega, \vec{r}) &= \frac{-ie^2 \omega A e^{iq_x x}}{(2\pi)^3 \hbar c} \times \\ &\times \int \frac{d\vec{k} (\vec{k} + \vec{k}_-)}{k_y^- (k_y - k_y^-)^2} \rho_k^0 \left[ 1 - \frac{\hbar(k_y - k_y^-)^2}{2m\omega} \exp\{i[k_y - k_y^- + i\delta_-]y\} \right] - \\ &- \int \frac{d\vec{k} (\vec{k} + \vec{k}_+)}{k_y^+ (k_y - k_y^+)^2} \rho_{k'}^0 \left[ 1 - \frac{\hbar(k_y - k_y^+)^2}{2m\omega} \exp\{i[k_y^+ - k_y + i\delta_+]y\} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь

$$y < 0, \quad k_y^\pm = \sqrt{k_x^2 \pm \frac{2m\omega}{\hbar}} > 0; \quad \vec{k}_\pm = (k_x, k_y^\pm, k_z), \quad \delta_\pm = \frac{m\nu}{\hbar k_y^\pm}.$$

Символ  $\int'$  означает, что интегрирование по  $k_y$  проводится в областях  $-\infty, -\sqrt{\frac{2m\omega}{\hbar}}; \sqrt{\frac{2m\omega}{\hbar}}, \infty$ , где

возможен процесс излучения кванта энергии электро-ном. Аналогичное выражение для  $\vec{j}'$  легко получить в области  $y < 0$ .

Видно, что ток  $\vec{j}'(\omega, \vec{r})$ , возникающий в резуль-тате электронных переходов между состояниями  $k_y$  и  $k'_y$  представляет собой бесконечный набор простран-ственных гармоник с периодом  $\frac{2\pi}{|k_y - k_y^\pm|}$ , зависящим от частоты поля и импульса частицы, с амплитудой, убывающей от границы как  $\exp(-\delta_\pm |y|)$ . В классиче-ском пределе  $k_y^2, k_y'^2 \gg \frac{2m\omega}{\hbar}$  такого рода гармоники известны как «волны Ван-Кампена» [10, 11], фазовая скорость которых равна скорости частицы. Подстав-ляя (6) в уравнение (7), находим потенциал, возбуж-даемый током  $\vec{j}'(\omega, x, y)$ :

$$\begin{aligned} A'_x(\omega, q_x, y) &= \frac{i\alpha(\omega, q_x, y)}{\epsilon(\omega)} A; \\ A'_y(\omega, q_x, y) &= \frac{A}{q_x \epsilon(\omega)} \frac{\partial \alpha}{\partial y}(\omega, q_x, y); \\ \alpha(\omega, q_x, y) &= \frac{e^2 q_x m}{\pi^2 \hbar^2} \times \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &\times \int' \frac{\rho_k^0 d\vec{k}}{k_y^- (k_y \mp k_y^-)^4} \left[ 1 - \frac{\hbar(k_y \mp k_y^-)^2}{2m\omega} \exp\{i(k_y \mp k_y^- \pm i\delta_-)y\} \right] - \\ &\int' \frac{\rho_{k'}^0 d\vec{k}}{k_y^+ (k_y \mp k_y^+)^4} \left[ 1 - \frac{\hbar(k_y \mp k_y^+)^2}{2m\omega} \exp\{i(\pm k_y^+ - k_y \pm i\delta_+)y\} \right] \end{aligned}$$

Здесь верхние знаки перед  $k_y^\mp$  и  $\delta_\mp$  относятся к полупространству  $y > 0$ , нижние, соответственно, к полупространству  $y < 0$ .

Посредством граничных условий теперь можно исключить неопределенные константы  $A_1$  и  $A_2$  и полу-чить дисперсионное уравнение:

$$\epsilon_1(\omega) \left[ 1 + i \frac{\alpha_2(\omega, q_x, 0)}{\epsilon_2(\omega)} \right] + \epsilon_2(\omega) \left[ 1 + i \frac{\alpha_1(\omega, q_x, 0)}{\epsilon_1(\omega)} \right] = 0. \quad (12)$$

Отсюда, при  $\left| \frac{\alpha(\omega, q_x, 0)}{\epsilon(\omega)} \right| \ll 1$  получаем:

$$\begin{aligned} \omega_s &= \frac{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2}{\epsilon_{01} + \epsilon_{02}}^{1/2}; \\ \Delta\omega_s &= \frac{i\omega_s}{2} \frac{[\alpha_1(\omega, q_x, 0) + \alpha_2(\omega, q_x, 0)]}{\epsilon_{01} + \epsilon_{02}}. \end{aligned}$$

Найдем теперь декременты затухания в различ-ных физических ситуациях. В случае максвелловского распределения электронов

$$\rho_k^0 = \frac{(2\pi\hbar)^3 n_0}{(2\pi m T)^{3/2}} e^{-\frac{\hbar^2 k^2}{2mT}},$$

выражение для  $\alpha(\omega, q_x, 0)$  можно преобразовать к следующему виду:

$$\alpha(\omega, q_x, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_0^2 q_x v_T}{\hbar \omega^4} (e^{\frac{\hbar \omega}{T}} - 1) \int_{-\infty}^{\infty} (x^2 + \frac{\hbar \omega}{T})^{\frac{1}{2}} x^2 e^{-x^2} dx.$$

Отсюда получаем :

$$\alpha = -2 \frac{\omega_0^2 q_x v_T}{\omega_s^3} \sqrt{\frac{T}{2\hbar \omega_s}}, \quad \frac{\hbar \omega_s}{T} \gg 1; \quad (13)$$

$$\alpha = -2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\omega_0^2 q_x v_T}{\omega_s^3}, \quad \frac{\hbar \omega_s}{T} \ll 1.$$

На границе двух плазменных сред, разделенных бесконечно высоким потенциальным барьером, выражения для декремента приобретают вид:

$$\Delta \omega_s = -i \frac{q_x}{\sqrt{2\hbar \omega_s}} \frac{\sum \omega_{0i}^2 v_{Ti} T_i^{1/2}}{\sum \omega_{0i}^2}; \quad (14)$$

$$\Delta \omega_s = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} i q_x \frac{\sum \omega_{0i}^2 v_{Ti}}{\sum \omega_{0i}^2}; \quad i = 1, 2, \dots$$

В случае бесконечно малого барьера :

$$\omega_{01} = \omega_{02}, \quad \varepsilon_{01} \neq \varepsilon_{02}, \quad \omega_s = \omega_0 \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}}}.$$

– декременты колебаний соответственно равны:

$$\Delta \omega_s = -i q_x v_T \sqrt{\frac{T}{2\hbar \omega_s}}, \quad \hbar \omega_s \gg T; \quad (15)$$

$$\Delta \omega_s = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} i q_x v_T, \quad \hbar \omega_s \ll T.$$

Сравнительный анализ экспериментальных [12] и расчетных данных, полученных с использованием величин декрементов затухания (14) – (15) показывает, что величина энергии излучения для большинства полупроводниковых приборов [7] (диодов) при наличии внешнего электромагнитного излучения (амплитуда напряженности электрического поля  $E < 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ , длительность импульса  $\Delta t_{\text{имп}} \approx 10^2 - 10^3 \text{ нс}$ ) определяется одним порядком величины  $\Delta W_{\text{изл}} \approx 10^{-7} - 10^{-9} \text{ Дж}$  и имеет общие тенденции изменения в зависимости от величин физических параметров комплектующих материалов и воздействующего импульса напряжения.

Получены расчетные соотношения, связывающие параметры полупроводниковых структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, температурой носителей с величиной декремента колебаний в классическом и квантовом приближениях.

Получены выражения для декрементов поверхностных плазмонов при наличии бесконечно высокого

и бесконечно малого потенциального барьера на границе раздела сред.

Получено кинетическое уравнение, описывающее изменение числа поверхностных плазмонов в результате их взаимодействия с электронами проводимости; приведены его решения, определяющие декремент колебаний и мощность спонтанного излучения частиц.

Предложена модель взаимодействия электронов проводимости полупроводящей среды с поверхностными колебаниями, когда взаимодействие волн и заряженных частиц, наведенных внешним излучением, носит характер случайных столкновений и описывается методом вторичного квантования системы.

Обоснована физическая модель возникновения обратимых отказов (влияния наведенных электромагнитным излучением токов на вольтамперные характеристики полупроводниковых приборов). Определены области параметров внешнего электромагнитного излучения, при которых реализуется данная физическая модель (амплитуда напряженности электрического

поля  $E < 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ , длительность импульса  $\Delta t_{\text{имп}} \approx 10^2 - 10^3 \text{ нс}$ ).

1. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. Москва: Радио и связь, 1988. 235 с.

2. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах: пер. с англ. / под ред. Гальперина М.В. Москва: Мир, 1979. 317 с.

3. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып.1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи / составитель Уайт Д.Р.Ж.: Сокр. пер. с англ. / под ред. Сапгира А.И. Москва: Сов.радио, 1978. 352 с.

4. Рикетс Л.У., Бриджес Дж.Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты: пер. с англ. Москва: Атомиздат, 1979. 327 с.

5. Устойчивость радиоэлектронной аппаратуры к воздействию электромагнитного импульса при ядерном взрыве. Радиоэлектроника за рубежом. Вып. 10 (1008). Москва: 1984. С. 8-10.

6. Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда В.М., Яковенко В.М. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. Киев: Наукова думка, 1991. 216 с.

7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Москва: Мир, 1984. 456 с.

8. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. Москва: Радио и связь, 1979. 225 с.

9. Стил М., Вюраль Б. Взаимодействие волн в плазме твердого тела. Москва: Атомиздат, 1973. 312 с.

10. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2013. № 27. С. 83-89.

11. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур

электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2013. № 27. С. 96 -103.

12. Кравченко В.И., Яковенко И.В., Лосев Ф.В. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения. Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. 2013. № 27. С.103-111.

### References (transliterated)

1. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izlucheniham [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing electromagnetic radiation]. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p.

2. Ott G. Metody podavlenija шумов i pomех v jelektronnyh sistemah: per.c angl.[ Methods of noise and noise suppression in electronic systems ] / pod red. Gal'perina M.V. Moscow: Mir, 1979. 317 s.

3. Jelektromagnitnaja sovместimost' radiojelektronnyh sredstv i neprednamerennye pomехi. Vyp.1. Obshhie voprosy JeMS. Mezhsistemnye pomехi [Electromagnetic compatibility of radio electronic equipment and unintended interference] / sostavitel' Uajt D.R.Zh.: Sokr. per. s angl. / pod red. Sapgira A.I. Moscow: Sov. radio, 1978. 352 s.

4. Rikets L.U., Bridzhes Dzh.Je., Majletta Dzh. Jelektromagnitnyj impul's i metody zashhity: per. s angl. Moscow: Atomizdat, 1979. 327 s.

5. Ustojchivost' radiojelektronnoj apparatury k vozdejstvu jelektromagnitnogo impul'sa pri jadernom vzryve. Radiojelektronika za rubezhom [Sustainability of electronic equipment to the effects of electromagnetic impulse in a nuclear explosion]. Vyp. 10 (1008). Moscow: 1984. S. 8-10.

6. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona

v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah [Electromagnetic phenomena of the microwave range in inhomogeneous semiconductor structures]. Kyiv: Naukova dumka. 1991. 216 p.

7. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov [Physics of semiconductor devices]. Moscow: Mir. 1984. 456 p.

8. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jelektromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svyazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p.

9. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela [Electromagnetic influences on communications structures]. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vnesnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhih jelektroradioizdelij [Influence of the flow of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation, on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 83-89.

11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh struktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izlucheniija [Attenuation of surface oscillations of semiconductor structures of electronic products under conditions of exposure to external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 96-103.

12. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izlucheniija [Kinetic mechanisms of interaction of surface oscillations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 103-111.

*Поступила (received) 27.04.2019.*

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

(**Князєв Володимир**) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID 0000-0002-7119-7790; e-mail: knyaz2@i.ua.

(**Кравченко Володимир Іванович**) – доктор технічних наук, професор, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна; e-mail: tc22@i.ua.

(**Яковенко Ігор Владімірович**) – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри Системи інформації Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», головний науковий співробітник; м. Харків, Україна; тел. (057) 707 66 18; e-mail: yakovenko60IV@ukr.net

(**Ваврив Людмила Владиславівна**) – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник; м. Харків, Україна, тел.: (057) 707-63-09; e-mail: l.v.vavriv@gmail.com

• • , • •

Определение вероятности поражения элементов наземных конструкций, включая стартовые космические комплексы, численными методами рассмотрено в большом числе работ, часть из которых представлена в списке литературы. Понимание физики процесса и использование современных вычислительных возможностей обеспечивают получение достаточно точных данных о местах наиболее вероятного удара молнии. Однако, для новых конструкций, которые еще не получили апробации на практике, рекомендуется проводить экспериментальное исследование по определению вероятности удара молнии в области поверхности объекта. Для этого, создаются физические модели объекта, в уменьшенном масштабе. Модели должны обладать электрофизическими характеристиками, аналогичными реальному объекту. Масштаб модели выбирается с учетом удобства ее эксплуатации при экспериментальных исследованиях и возможностей высоковольтной испытательной установки (максимальным значением импульсного напряжения). Создание масштабной модели представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку необходимо максимально учесть особенности реального объекта. Для получения адекватных результатов испытаний требуется математическая обработка, что обуславливается необходимостью учесть физические ограничения, возникающие в процессе моделирования молнии. Рассмотрена математическая модель оценки адекватности результатов определения вероятности поражения прямым ударом молнии наземных конструкций путем испытаний на масштабной модели. Анализ предварительных результатов экспериментов показал, что использование высокоскоростных видеокамер в процессе испытаний не является эффективным, поскольку приводит к накоплению большого объема мало информативных данных. Кроме того, длительность разряда составляет микросекунды, вследствие чего при регистрации этот процесс может не записаться. Наиболее объективная информация получается при использовании фотокамер с длительной выдержкой. Проанализированы проблемы согласования существующих моделей различных стадий развития молниевых разрядов при макетных испытаниях. Показано, что модели развития молнии и длинной искры можно согласовать по отдельности для трех стадий: этап движения головки верхнего лидера до начала образования встречных лидеров; этап «ориентации» движения головки верхнего лидера за счет притяжения зарядами встречных лидеров; этап окончательного пробоя между сближившимися головками встречных лидеров («finaljump»). Разработана модель распределения положения головки нисходящего лидера до стадии «выбора и захвата». Обосновано подобие масштабного макетирования разряда молнии на стадии ориентировки нисходящего лидера одним из восходящих. Разработана методика адаптации макетного эксперимента в рамках вероятностной модели.

: молния, вероятность удара, наземный объект, испытания, масштабная модель, корреляция результатов с реальной молнией.

• • , • •

Визначення ймовірності ураження елементів наземних конструкцій, включаючи стартові космічні комплекси, чисельними методами розглянуто в великому числі робіт, частина з яких представлена в списку літератури. Розуміння фізики процесу і використання сучасних обчислювальних можливостей забезпечують отримання досить точних даних про місця найбільш ймовірного удару блискавки. Однак, для нових конструкцій, які ще не отримали апробацію на практиці, рекомендується проводити експериментальне дослідження з визначення ймовірності удару блискавки в області поверхні об'єкту. Для цього, створюються фізичні моделі об'єкта, в зменшеному масштабі. Моделі повинні володіти електрофізичними характеристиками, аналогічними реальному об'єкту. Масштаб моделі вибирається з урахуванням зручності її експлуатації при експериментальних дослідженнях і можливостей високовольтної випробувальної установки (максимальним значенням імпульсного напруги). Створення масштабної моделі являє собою досить складну задачу, оскільки необхідно максимально врахувати особливості реального об'єкта. Для отримання адекватних результатів випробувань потрібно математична обробка, що обумовлюється необхідністю врахувати фізичні обмеження, що виникають в процесі моделювання блискавки. Розглянуто математичну модель оцінки його результатів визначення ймовірності ураження прямим ударом блискавки наземних конструкцій шляхом випробувань на масштабній моделі. Аналіз попередніх результатів експериментів показав, що використання високошвидкісних відеокамер в процесі випробувань не є ефективним, оскільки призводить до накопичення великого обсягу мало інформативних даних. Крім того, тривалість розряду становить микросекунди, внаслідок чого при реєстрації цей процес може не записатися. Найбільш об'єктивна інформація виходить при використанні фотокамер з тривалою витримкою. Проаналізовано проблеми узгодження існуючих моделей різних стадій розвитку блискавичного розряду при макетних випробуваннях. Показано, що моделі розвитку блискавки і довгою іскри можна узгодити окремо для трьох стадій: етап руху головки верхнього лідера до початку освіти зустрічних лідерів; етап «орієнтації» руху головки верхнього лідера за рахунок тяжіння зарядами зустрічних лідерів; етап остаточного пробоя між зблилися головками зустрічних лідерів («finaljump»). Розроблено модель розподілу положення головки спадного лідера до стадії «вибору і захоплення». Обґрунтовано подоби масштабного

макетування розряду блискавки на стадії орієнтування спадного лідера одним з висхідних. Розроблено методику адаптації макетного експерименту в рамках ймовірнісної моделі.

: блискавка, ймовірність удару, наземний об'єкт, випробування, масштабна модель, кореляція результатів з реальною блискавкою.

V.V.KNIAZIEV, S.I. MEL'NYK

### ADEQUACY OF THE RESULTS OF DETERMINING THE PROBABILITY OF DAMAGE BY A DIRECT SHOCK OF LIGHTNESS OF A GROUND-DOOR DESIGN BY MEANS OF TESTS ON A SCALE MODEL

The determination of the probability of damage to elements of ground structures, including launching space complexes, is considered by numerical methods in a large number of works, some of which are presented in the list of references. Understanding the physics of the process and the use of modern computing capabilities provide sufficiently accurate data on the places most likely to strike a lightning. However, for new designs that have not yet been tested in practice, it is recommended to conduct an experimental study to determine the likelihood of a lightning strike in the surface area of the object. For this, physical models of the object are created, on a reduced scale. Models must have electro physical characteristics similar to a real object. The scale of the model is chosen taking into account the convenience of its operation in experimental studies and the capabilities of the high-voltage test facility (maximum pulse voltage value). Creating a scale model is a rather complicated task, since it is necessary to take into account the features of a real object as much as possible. To obtain adequate test results, mathematical processing is required, which is caused by the need to take into account the physical limitations arising in the lightning modeling process. A mathematical model for assessing the adequacy of the results of determining the likelihood of a direct strike by lightning of ground structures by testing on a scale model is considered. An analysis of preliminary experimental results showed that the use of high-speed video cameras during the testing process is not effective, since it leads to the accumulation of a large amount of little informative data. In addition, the duration of the discharge is microseconds, so that during the registration this process may not be recorded. The most objective information is obtained when using cameras with long exposure. The problems of matching existing models of different stages of lightning discharge development during mock-up tests are analyzed. It is shown that the models of development of lightning and a long spark can be coordinated separately for the three stages: the stage of movement of the head of the upper leader before the formation of counter leaders; the stage of «orientation» of the movement of the head of the upper leader due to the attraction by the charges of the counter leaders; stage of the final breakdown between the converging heads of the counter leaders («final jump»). A model has been developed for the distribution of the position of the head of the downward leader to the «choice and capture» stage. The similarity of the scale prototyping of the lightning discharge at the stage of orientation of a descending leader is one of the ascending ones. A method of adapting a prototype experiment within a probabilistic model has been developed.

**Keywords:** lightning, probability of impact, ground object, tests, scale model, correlation of results with real lightning.

. Для определения вероятности поражения прямым ударом молнии проводят эксперимент, в котором имитируют молниевый разряд с помощью специального оборудования [1]. При этом:

– последовательно размещают вертикальный стержень «А», на который подается импульс высокого напряжения, в узловых точках горизонтальной плоскости на заданной высоте;

– амплитуду импульса повышают до получения устойчивого разряда;

– в каждой узловой точке получают статистику распределения точек попадания канала разряда;

– усреднением полученных результатов по всем узлам сетки определяют вероятности поражения молнией различных зон исследуемых объектов.

Задачей настоящего исследования является анализ и аргументация соответствия результатов, полученных при масштабном макетировании молниевых разрядов реальному процессу. А также, оценка погрешности расчета вероятностей попадания молнии в различные точки наземных сооружений и объектов с помощью экспериментов, проведенных на масштабном макете.

Для ее решения разработана информационная модель процесса разряда молнии и проверена ее адекватность с помощью численного моделирования в среде COMSOL (версия 5.3а).

Общепризнанная стримерно-лидерная модель

образования молниевых разрядов предполагает несколько последовательных стадий, в основе которых лежат различные физические механизмы.

При моделировании молниевых разрядов на масштабном макете в идеальном случае требуется полное соответствие как физических стадий двух процессов, так и геометрического подобия параметров каждой стадии разряда молнии и разряда в лабораторных условиях. При масштабном макетировании процесса неявно предполагается, что:

– вертикальный стержень имитирует спускающийся лидер молнии;

– вероятность пробоя в ту или иную область конструкции равна вероятности попадания в аналогичную область оригинального изделия;

– искровой разряд от конца стержня к точке конструкции аналогичен молниевому разряду.

Однако, анализ подобных экспериментов и сравнение их результатов со статистикой попадания реальных молний в наземные объекты показывает [2], что полная физическая имитация молнии на макете невозможна.

Это связано, прежде всего, с тем, что геометрические параметры, характеризующие различные компоненты молниевых разрядов, такие как: характерный размер шага нисходящего ступенчатого лидера; длина финального скачка; характерный размер стримерной зоны; расстояние начала ориентации нисходящего

лидера в разной степени могут зависеть от разности потенциалов между элементами разряда, напряженности поля в различных точках макета, градиента напряженности, силы тока молнии.

В то же время, условия эксперимента предполагают возможность варьирования всего двух параметров импульса, подаваемого на верхний электрод: напряжение и длительность. Поэтому, обеспечить одновременно пропорциональное уменьшение геометрических параметров разряда молнии не представляется возможным.

В этой ситуации мы воспользовались возможностью отказаться от точной физической имитации молнии, а ограничились обеспечением лишь конечного результата – совпадения суммарной вероятности попадания в ту или иную область макета. Для этого воспользовались модифицированной версией вероятностного подхода к описанию процесса ориентации нисходящего лидера. Детали такого подхода и алгоритм моделирования описан далее.

Оказывается, что в этом подходе удается нивелировать отличия параметров физических процессов, или скорректировать их соответствующими поправками к полученным результатам.

Для построения упрощенной (информационной) модели формирования и ориентации молниевых разрядов проанализируем влияние отдельных этапов на распределение вероятности попадания.

Многочисленные экспериментальные исследования и феноменологические модели молнии [2-31] позволяют выделить следующие основные этапы этого процесса:

- из грозового облака начинает спускаться лидер. Траектория спускающегося лидера отрицательной полярности представляет собой случайную зигзагообразную линию;

- скачкообразный характер движения лидера возникает в результате стримерного механизма образования его канала. В промежутках между скачками в области головки лидера образуется множество стримеров, которые формируют объемный заряд перед головкой лидера, разогревают эту область и создают условия для следующего скачка;

- формирование и разогрев стримерной области, а также ее ориентация и размеры определяются в основном локальной напряженностью электрического поля вблизи текущего положения головки нисходящего лидера и параметрами состояния атмосферы в этой области;

- так как последние подвержены флуктуациям, то направление и длина следующего скачка головки лидера носит стохастический характер;

- при приближении к поверхности земли заряд нисходящего лидера начинает создавать на наземных объектах существенный заряд противоположного знака (дополнительно к зарядам, наведенным грозовой тучей);

- при достижении определенного уровня напря-

женности на выступающих острых концах наземных объектов возникают встречные лидеры;

- один из них своим зарядом «перехватывает» управление траекторией нисходящего лидера и сближается с ним;

- при достижении определенного значения напряженности между головками встречных лидеров возникает пробой воздушного промежутка.

При прямом переносе результатов оценки вероятности прямого удара, полученных в эксперименте, на реальную конструкцию возникают погрешности двух типов:

- погрешности, связанные с различием механизмов возникновения разряда в эксперименте и молнии;

- погрешности, возникающие в силу масштабирования макета наземных сооружений и конструкций.

Далее проанализируем погрешности, возникающие при переносе результатов макетирования на реальный объект для каждого из этапов формирования молнии в рассмотренной схеме. А затем максимально упростим описание тех этапов, пренебрежение точным описанием которых практически не влияет на окончательный результат.

*Этап движения головки верхнего лидера до начала образования встречных лидеров.*

Отличие макетного эксперимента от реального разряда молнии заключается в том, что сам лидер моделируется проводящим жестким стержнем, а его конечное положение фиксируется, после чего на стержень подается высокое напряжение. При этом в макетном эксперименте движение верхнего лидера до некоторой высоты вообще не моделируется, а весовой вклад в интегральное распределение вероятности попадания разряда молнии считается одинаковым для всех точек сетки. Однако, неоднородность поля зарядов, наведенных на наземных конструкциях, приводит к тому, что нисходящий лидер начинает ориентировку - смещение в сторону выступающих концов наземных сооружений, на расстояниях, существенно превышающих их высоту.

На этом этапе развития молнии значения напряженности поля вблизи острых концов наземных сооружений еще недостаточны для возникновения встречных лидеров и влияние наведенных зарядов может быть учтено на основании решения электростатической задачи. Влияние этого слабого поля можно свести к расчету поверхностей, разграничивающих силовые линии поля, попадающие в ту или иную область возможного удара молнии. Был разработан алгоритм такого расчета и проведены компьютерные эксперименты, подтверждающие его работоспособность.

Тем не менее, условия проведения макетного эксперимента (жестко заданное положение верхнего электрода на относительно малой высоте) не позволяют смоделировать слабые отклонения спускающегося с большой высоты лидера. В связи с этим нами разработан алгоритм коррекции результатов макетного эксперимента, который основан на численном решении электростатической задачи.

*Этап «ориентации» движения головки верхнего*

лидера за счет притяжения зарядами встречных лидеров

По мере снижения головки нисходящего лидера молнии электростатическое поле, наведенное на выступающих острых углах и ребрах наземных конструкций, увеличивается. Это приводит к тому, что интенсивность возникновения на них стримеров и их длина увеличиваются, температура стримерной области повышается, и возникают условия для образования встречных (восходящих) лидеров.

Далее головка одного из них оказывается в более выгодных условиях и «перехватывает» нисходящий лидер. Их дальнейшее движение навстречу друг другу не поддается простому моделированию. Однако на окончательное распределение вероятностей конкретный вид траектории сближения уже не оказывает существенного влияния.

Поэтому при анализе второго этапа образования молнии мы ограничимся оценкой вероятности «выбора» активного лидера из множества возникающих встречных лидеров.

Такой выбор связан со стохастичностью свойств воздуха в промежутке между электродами. Ранее (на предыдущем этапе работы) для численной оценки мы ограничились феноменологической моделью рассеяния точки попадания молнии, используя экспериментально известный параметр стохастичности - 10%. На этапе макетирования мы можем более точно исследовать этот процесс и уточнить сделанную ранее оценку вероятностей, опираясь на данные макетного эксперимента. Анализ модели этого этапа и алгоритм ее привязки к реальному молниевому разряду подробно описан далее.

*Этап окончательного пробоя между сближившимися головками встречных лидеров («finaljump»).*

На этом этапе происходит окончательное образование ионизированного проводящего воздушного канала между электродами. Естественно предположить, что при этом ранее образованные проводящие каналы встречных лидеров не меняют своего расположения. Поэтому этот этап не оказывает влияния на вероятность попадания молнии, и мы его рассматривать далее не будем.

Моделирование распределения положения головки нисходящего лидера до стадии «выбора и захвата». Отличие макетного эксперимента от реального разряда молнии заключается в том, что сам лидер моделируется проводящим жестким стержнем, а его конечное положение фиксируется до того, как на стержень подается высокое напряжение. При этом в макетном эксперименте движение нисходящего лидера вплоть до некоторой высоты вообще не моделируется, а задается априорно. В этой ситуации задача заключается в том, чтобы оценить погрешности макетирования, связанные с этим отличием, а также, по возможности, внести коррекцию в окончательные результаты.

Как показывают многочисленные эксперимен-

тальные исследования и разумные физические оценки, наведенные на наземных объектах заряды слишком малы, чтобы существенно влиять на траекторию движения ступенчатого лидера [3].

Очевидно, что при однородном вертикальном поле грозового облака случайные отклонения траектории лидера от вертикали симметричны. Если полагать, что плотность вероятности возникновения ступенчатых лидеров на большой высоте однородна, то координата головки лидера при ее снижении может существенно отклоняться от начального значения, но при этом распределение остается симметричным. Поэтому при снижении распределение вероятностей положения головки лидера остается почти однородным (неоднородность не более 5 %) вплоть до той высоты, на которой она вызывает возникновение встречных (восходящих) лидеров.

В эксперименте на макете эта однородность обеспечивается серией измерений с регулярным расположением конца электрода в узлах сетки на заданной высоте (рис 1). Для имитации однородности распределения реальных молний над объектом эта высота должна в несколько раз превышать высоту выступающих конструкций макета.

Кроме того, в силу того, что масштабному подобию соответствует только стадия «выбора и захвата» одним из восходящих лидеров нисходящего, высота расположения верхнего электрода должна приблизительно совпадать (в масштабе макета) с высотой, на которой начинается эта стадия.

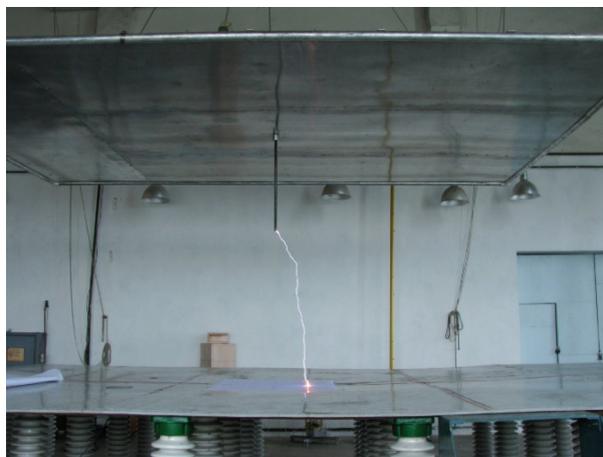


Рис. 1. Экспериментальное оборудование для моделирования молниевое разряда и определения вероятности попадания в различные зоны наземных объектов

Для учета возникающей при этом погрешности мы можем рассчитать (численным методом с помощью пакета COMSOL 5.3a) неоднородное распределение поля в плоскости расположения конца электрода, вызванное зарядами, наведенными на наземных конструкциях. Одно из таких иллюстративных распределений (при различном положении головки нисходящего лидера) показано на рис. 2. Для расчета вероятностей попадания молнии в конечное число зон поражения наземных конструкций в первом приближении достаточно рассчитать силовые линии, (в трехмерной

модели поверхности силовых линий), которые заканчиваются на границах этих зон.

Аналогичный принцип можно использовать и для корректировки неоднородности поля в макетных измерениях. Можно считать, что наиболее вероятная траектория ступенчатого лидера (до стадии возникновения встречного лидера) соответствует силовым линиям поля грозовой тучи [4].

Поэтому результаты, полученные при макетных измерениях для каждой из узловых точек (рис.1), следует умножить на соответствующий поправочных коэффициент. Этот коэффициент пропорционален напряженности неоднородного поля в плоскости расположения конца верхнего электрода (рис.4) и рассчитывается с учетом нормировки на единицу общей вероятности молниевых разряда.

Заметим, что при этом поле грозовой тучи считается однородным, а неоднородность возникает только за счет влияния зарядов, наведенных на наземных конструкциях (без учета заряда нисходящего лидера). В приведенном примере вклад этой неоднородности в окончательное распределение вероятности попадания молнии в элементы наземных конструкций достигает 3% (отличие между напряженностью поля над вершущками мачт и острием ракетносителя).

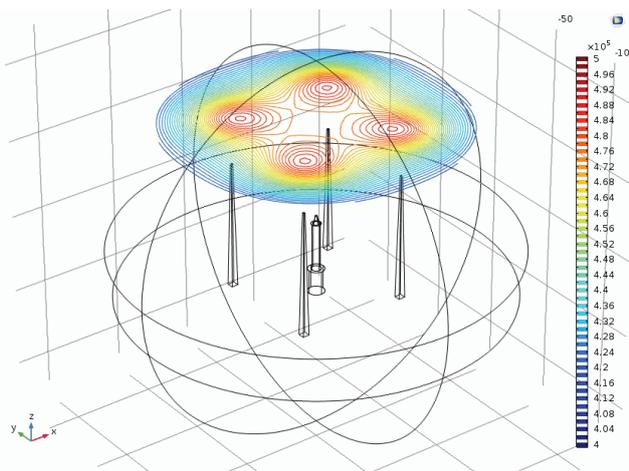


Рис. 2. Результаты численного расчета напряженности внешнего поля в плоскости расположения конца верхнего электрода при макетных экспериментах

Как следует из общепризнанного феноменологического описания процессов образования молнии или длинной искры, в них присутствует закономерная и стохастическая составляющие. Наиболее простым представлением описания такого типа является вероятностное распределение  $\varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}(U_f)$  пробивного напряжения  $U_f$ , при заданной точке расположения головки ступенчатого лидера  $\vec{r}_{sl}$  и точке попадания искры на наземной конструкции  $\vec{r}_i$ . Если возможных точек (зон попадания) несколько, то подобное распределение вероятностей можно получить для каждой из них.

В случае, когда статистики попадания длинной искры из  $\vec{r}_{sl}$  в  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$  независимы, вероятностная модель позволяет рассчитать статистику попадания в пару этих точек одновременно  $\varphi_{[\vec{r}_{sl}, (\vec{r}_1, \vec{r}_2)]}(U_f)$ . А также – относительную вероятность попадания в каждую из них [3].

При подаче напряжения от общего источника в эти точки вероятность пробоя одного из двух разрядных промежутков определяется по формулам:

$$P_1 = \int_0^\infty \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f) [1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f)] dU_f;$$

$$P_2 = \int_0^\infty \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f) [1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f)] dU_f; \quad (1)$$

где  $\Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f) = \int_0^{U_f} \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f') dU_f'$ ;  $\Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f) = \int_0^{U_f} \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f') dU_f'$  и  $P_1 + P_2 = 1$ .

Распределение вероятности напряжения пробоя для системы двух точек определяется формальным соотношением:

$$\varphi_{[\vec{r}_{sl}, (\vec{r}_1, \vec{r}_2)]}(U_f) = \int_0^{U_f} \{ \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f') [1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f')] + \varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_2]}(U_f') [1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_1]}(U_f')] \} dU_f'. \quad (2)$$

Как показано в многочисленных экспериментах, распределение  $\varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}(U_f)$  хорошо аппроксимируется гауссоидой:

$$\varphi_{[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}(U_f) \approx \dots \varepsilon_e^{-\frac{U_f - U_{f[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}}{2\sigma_{U[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}^2}}. \quad (3)$$

При этом параметры распределения  $U_{f[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}$  и  $\sigma_{U[\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i]}^2$  зависят от расположения пары точек (концов длинной искры). Первая из них задана положением  $\vec{r}_{sl}$  конца верхнего электрода, а вторая ( $\vec{r}_i$ ) – положением одной из возможных точек попадания искры или их набором.

*Проблемы, возникающие при использовании вероятностного подхода к определению точки удара молнии для близко расположенных объектов.*

Заметим, что в эксперименте по определению  $U_f$  на макете сначала конец электрода помещают в точку  $\vec{r}_{sl}$ , а затем плавно повышают напряжение на нем до получения длинной искры. В отличие от этого, при опускании ступенчатого лидера молнии разность потенциалов между его головкой и наземными объектами остается практически постоянной, в то время как меняется расположение  $\vec{r}_{sl}$  головки лидера. Поэтому, пробой в реальной молнии надо описывать статистикой  $\omega_{U_f}(\vec{r}_{sl}, \vec{r}_i)$  – плотностью вероятности того, что ориентировка ступенчатого лидера, возникновение встречного лидера и пробой между ними произойдут из точки  $\vec{r}_{sl}$  расположения первого при заданном напряжении  $U_f$  и конечной точке попадания  $\vec{r}_i$ .

Для согласования этих двух статистик необходи-

мо сделать дополнительные феноменологические предположения. Так, например, в [4, раздел 5.5] предполагают, что средние пробивные напряженности поля равны для различных  $\vec{r}_{sl}$  и  $U_f$ , тем самым жестко привязывая две статистики одну к другой.

В дальнейшем именно это допущение и приводит к «полному провалу теории», по выражению авторов [4], при близком расположении возможных точек попадания (получению расчетной вероятности 0,4 при фактической 0,01). Далее мы построим более корректную связь этих статистик и воспользуемся вероятностным подходом для привязки результатов макетирования к реальным вероятностям попадания молнии.

« »

Заметим, что в качестве объяснения взаимного влияния близко расположенных наземных объектов авторы [4] привлекают эффект подавления зарядом уже возникшего встречного лидера поля близлежащих возможных мест попадания. В результате оказывается, что даже при возникновении множества встречных лидеров активным оказывается первый из них, в то время как остальные лишь пассивно меняют конфигурацию поля и искривляют траекторию основного лидера.

Мы далее также будем придерживаться этой концепции выбора одного из встречных лидеров. По крайней мере, будем считать, что вероятность нарушения этого правила слишком мала, чтобы существенно повлиять на результат моделирования.

При этом мы учитываем, что могут существовать и ранее возникшие встречные лидеры. Но будем считать, что они затухнут до того, как начнут оказывать влияние на ориентацию ступенчатого лидера и вероятность возникновения последующих встречных лидеров.

В этом приближении вероятность возникновения «активного» встречного лидера (того, который формирует длинную искру между собой и ступенчатым лидером) зависит только от напряженности поля вблизи наземных конструкций. А она, в свою очередь, от состояния атмосферы и текущего положения головки ступенчатого лидера  $\vec{r}_{sl}$ .

Другими словами, статистики возникновения длинной искры между головкой ступенчатого лидера ( $\vec{r}_{sl}$ ) и двумя точками возникновения встречного лидера ( $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ ) можно считать независимыми, если записывать их не для пробивного напряжения, а для напряженности поля в локальной области вблизи рассматриваемого острия.

При этом средняя локальная напряженность поля рассчитывается как решение электростатической задачи при заданном напряжении между головкой ступенчатого лидера и землей.

Некорректность применения формул вероятностного подхода при близком расположении наземных

электродов заключается не в том, что пренебрегают влиянием уже возникшего встречного лидера на параметр случайного разброса  $\sigma_f$ . Мы полагаем, что причина в пренебрежении их взаимным влиянием на среднюю локальную напряженность электрического поля вблизи точек возможного образования встречных лидеров.

Ошибка может возникать потому, что в статистике среднего по всей длине значения напряженности, рассчитанного как

$$\overline{E_f} = \frac{U_f}{|\vec{r}_{sl} - \vec{r}_i|} = E_f(\vec{r}_i) \quad (4)$$

учтено не взаимное расположения электродов (и электростатическое влияние друг на друга), а только расстояние между ними и головкой ступенчатого лидера.

Для корректного перехода от статистики макетных экспериментов к статистике реальных молниевых разрядов необходимо учитывать не просто расстояния до мест возможного попадания, а локальную напряженность электрического поля, индуцированного в этих местах.

При этом на остриях наземных конструкций напряженность поля уменьшается за счет процесса ионизации и коронного разряда. Поэтому необходимо учитывать напряженность не на самой поверхности проводника, а на некотором расстоянии, равном характерной длине возникающих стримеров.

Таким образом, как и в вероятностном методе, мы будем рассматривать стохастическую модель «выбора» точки попадания, но связывать ее случайный характер не с разностью потенциалов между электродами, а со стохастическими изменениями значения напряженности поля вблизи вероятной точки попадания, при которой возникнет встречный лидер.

Будем считать, что приближенно она может быть задана функцией Гаусса, как и экспериментальное распределение напряжений пробоя.

$$\omega_{r_{sl}}(E_{r_0}) \approx \dots \varepsilon_e \frac{\overline{E_{r_0}} - E_{r_0}}{2\sigma_{fE}^2} \quad (5)$$

Здесь  $E_{r_0}$  – фактическая напряженность поля на расстоянии  $r_0$  от точки возможного попадания искры (молнии), а  $\overline{E_{r_0}}$  – ее среднее значение.

Недостатком такого подхода является сложность вычисления (оценки)  $\overline{E_{r_0}}$  для различных вариантов расположения наземных сооружений. Однако, с другой стороны, именно это и позволяет учесть взаимное влияние различных областей возможного удара уже на стадии моделирования. Более того, в первом приближении мы можем считать, что параметры  $r_0$ ,  $\overline{E_{r_0}}$ ,  $\sigma_{fE}^2$  одинаковы для различных областей, так как они зависят, в основном, от физики образования стримеров и свойств воздуха, и только потом от формы электродов.

Другим недостатком такого подхода является тот факт, что в эксперименте мы меряем зависимость

$\varphi_{[\vec{r}_{sl}, (\vec{r}_1, \vec{r}_2)]}(U_f)$ , а не  $\omega_{\vec{r}_{sl}}(E_{r_0})$ . Тем не менее, мы можем получить аналитическую связь этих статистик для простой конструкции (например, прямой стержень заданной высоты). А затем, на основании экспериментальных данных  $\varphi_{[\vec{r}_{sl}, (\vec{r}_1, \vec{r}_2)]}(U_f)$  для этой конструкции рассчитать и  $\omega_{\vec{r}_{sl}}(E_{r_0})$ .

Заметим, что при фиксированном положении электродов в макетном эксперименте  $\overline{U_{r_0}} / \sigma_{fE}^2 = \overline{U_f} / \sigma_U^2$ . Решая электростатическую задачу отдельно для каждой начальной точки расположения головки ступенчатого лидера  $\vec{r}_{sl}$ , и используя функцию  $\omega_{\vec{r}_{sl}}(E_{r_0})$ , мы, в принципе, можем рассчитать вероятности попадания длинной искры (или молнии) в различные точки наземных конструкций при заданном значении  $\vec{r}_{sl}$ . Для этого необходимо использовать вероятностный подход к определению точки удара молнии.

Если дополнительно задать плотность вероятности того, что головка ступенчатого лидера окажется в точке  $\vec{r}_{sl}$ , то интегрируя по всей плоскости расположения  $\vec{r}_{sl}$ , мы получим общее распределение вероятностей попадания искры в различные области наземных конструкций. Таким образом, после описанной корректировки вероятностная модель длинной искры может быть использована для расчета вероятностей попадания в различные точки наземных конструкций.

Описанную выше вероятностную модель можно использовать как для реального объекта и реальной молнии, так и для уменьшенного макета. Проблема переноса полученных на макете результатов на реальный объект заключается в том, что хотя случайные процессы и описываются одинаковыми стохастическими моделями, их параметры, такие, как  $r_0$ ,  $\overline{E_{r_0}}$ ,  $\sigma_{fE}^2$ , могут быть различны.

Воспользуемся геометрическим подобием макета и оригинального объекта и адаптируем параметры макета для получения максимального соответствия результатов.

Прежде всего отметим, что геометрическое подобие обеспечивает и электростатическое подобие поля, наведенного спускающимся ступенчатым лидером. Для того, чтобы возникновение встречного лидера было с той же относительной вероятностью, необходимо пропорциональное уменьшение и остальных геометрических параметров модели.

Таким параметром является значение  $r_0$  – эффективное расстояние до поверхности, напряженность поля на которой определяет вероятность возникновения встречного лидера. Мы полагаем, что оно соответствует длине стримеров, генерируемых на поверхности электрода. Для определения этой длины используем данные экспериментов. В частности, в экспериментальных исследованиях установлено [2], что

«стримерам в составе стримерной вспышки удается пересечь межэлектродный промежуток длины  $d$ , только если отношение превышает определенное критическое значение, которое зависит от рода газа и его состояния. В воздухе при нормальных условиях в широком диапазоне».

Таким образом, можно полагать, что длина стримерной вспышки определяется расстоянием, на котором напряженность поля спадает до значения  $E_{cr}$ . Существенно то, что это значение одинаково в широком диапазоне межэлектродных промежутков (0,1-10 м). Можно предположить, что и для больших значений (недоступных в экспериментах) оно также меняется незначительно. Поэтому для обеспечения масштабного подобия стохастического закона образования встречных стримеров необходимо обеспечить такое же значение  $E_{cr}$  на пропорционально меньших расстояниях. Но это условие выполняется автоматически при пропорциональном уменьшении разности потенциалов между электродами (в соответствии с масштабным коэффициентом). Можно также учесть небольшие различия в значениях для разных масштабов и соответственно уменьшить разность потенциалов еще на 10-20 %.

Дополнительным условием подобия стохастических моделей является обеспечение одинаковости значений  $\overline{E_{r_0}}$ ,  $\sigma_{fE}^2$  при заданных значениях  $\vec{r}_{sl}$  и  $\vec{r}_i$  в объекте и в его макете. Ранее мы определили  $r_0$ , как эффективное расстояние до поверхности, на котором напряженность поля определяет вероятность возникновения встречного лидера. Как следует из [4], таким расстоянием можно считать расстояние, на котором напряженность поля равна  $E_{cr}$ . Но тогда значение напряженности поля на расстоянии, определенном таким образом, точно равно  $E_{cr}$ , а случайный разброс значений следует отнести к параметру  $r_0$ .

В результате, вместо стохастической модели (5) мы можем использовать модель случайной длины стримера  $\omega_{\vec{r}_{sl}}(\vec{r}_{0l}, \vec{r}_i)$  в которой функция распределения вероятности уже не является гауссоидой, а определяется спецификой электростатического поля вблизи наземных конструкций. Кроме того, она может быть различна для различных точек  $\vec{r}_i$  на их поверхности.

Таким образом, стохастическая модель длинной искры между заданными точками (положениями концов электродов) может быть интерпретирована следующим образом.

Приведенные выше аргументы сводятся к формированию нового модифицированного вероятностного подхода к определению вероятностей попадания молнии. Перечислим его основные положения:

Физической причиной стохастичности напряжения пробоя при заданных положениях электродов  $\vec{r}_{sl}$  и  $\vec{r}_i$  является случайные флуктуации свойств воздушного промежутка и процессов ионизации и т.п., про-

ходящих в нем при образовании длинной искры.

Экспериментальные данные показывают, что напряжение пробоя может быть описано формулой

$$\varphi_{[\vec{r}_{si}, \vec{r}_i]}(U_f) \approx \varepsilon_e \frac{U_f - U_{f[\vec{r}_{si}, \vec{r}_i]}}{2\sigma_{U[\vec{r}_{si}, \vec{r}_i]}} \quad (6)$$

Описанная выше модель формирования длинной искры (возникновение встречного лидера и последующее его сближение с нисходящим лидером) позволяет интерпретировать эту стохастичность, как следствие стохастичности расстояния  $r_0$ , на котором напряженность электрического поля, наведенного верхним лидером, равна  $E_{cr}$ .

Широко известный электро-геометрический метод определения возможных зон поражения может быть применен к полю, в котором стохастичность «выбора» одного из восходящих встречных лидеров сводится к стохастичности длины стримера (с напряженностью  $E_{cr}$  на конце стримера).

Для определения вероятностного распределения значений  $r_0(\vec{r}_i)$  для различных точек  $\vec{r}_i$  на поверхности наземных конструкций может быть использована экспериментальная зависимость (6) и решение электростатической задачи.

В масштабном макетном эксперименте подобие электростатических полей автоматически обеспечивает пропорциональное уменьшение значений  $r_0(\vec{r}_i)$  при сохранении вероятностных распределений.

Отметим, что напряженность поля в каждой точке пространства между электродами также подвержена флуктуациям. Будем считать, что среднее значение напряженности в ней соответствует решению электро-

статической задачи при заданной конфигурации проводящих электродов и поданного напряжения.

При случайном увеличении напряжения между электродами напряженность в каждой точке пространства увеличивается пропорционально напряжению и значение  $r_0$  также увеличивается. Однако, степень увеличения  $r_0$  может существенно зависеть от конфигурации поля. Проиллюстрируем возможность «пробоя» защитного поля системы молниезащиты на примере численного расчета в COMSOL.

На рис. 3 показаны результаты расчета изолиний напряженности электростатического поля, индуцированного на наземных конструкциях внешним однородным полем. Как видно из рисунка, при этом критическое значение напряженности ( $E_{1cr} = 4,65$  кВ/см) достигается на малом расстоянии от головки ракетносителя. Следующая за этой точкой область меньшей напряженности не позволяет стримерам, возникшим на головке ракетносителя, продвинуться дальше и «захватить» нисходящий лидер. В этом случае в соответствии с электро-геометрическим методом удар молнии будет перехвачен системой молниезащиты (попадет в верхушки мачт или соединяющие их проводящие тросы).

Однако, даже при 5%-м случайном скачке напряженности поля в этой области, минимальное значение в ней оказывается больше  $E_{cr}$  и стример, возникший на головке ракетносителя распространяется вплоть до точки В (в которой после 5 % повышения напряженность окажется равной  $E_{1cr}$ ). В этом случае он может «перехватить» ориентировку нисходящего лидера у стримеров, возникших на верхушках молниезащитных мачт.

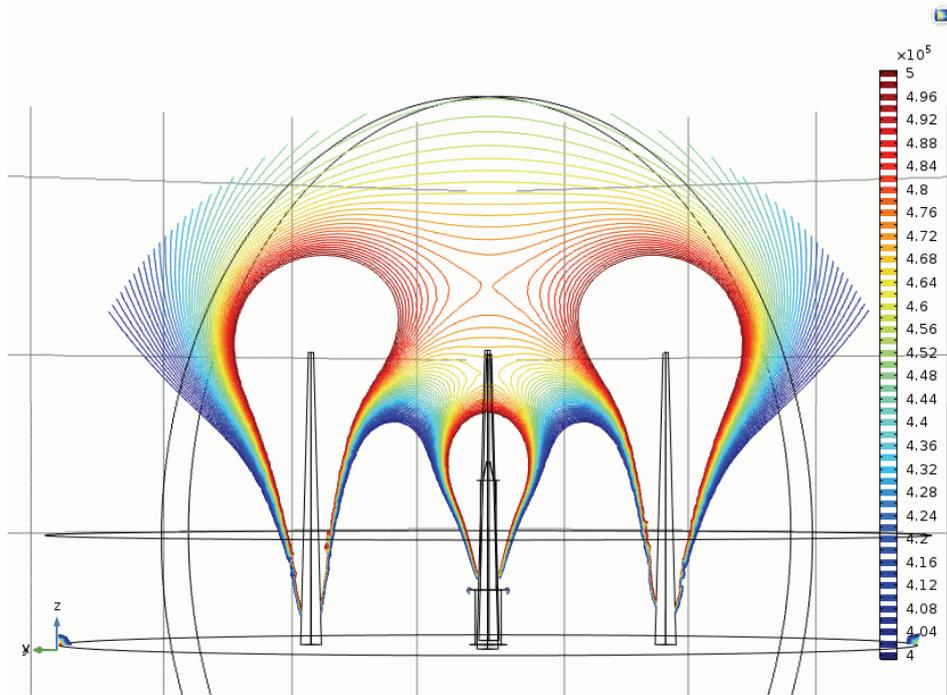


Рис.3. Иллюстрация возможности перехвата молнии ракетносителем при случайной флуктуации напряженности поля и соответственного увеличения длины стримеров

Таким образом, в вероятностной модели пробоя длинной искры случайный характер пробоя и взаимное влияние близкорасположенных наземных конструкций могут быть учтены на уровне решения электростатической задачи и не требуют детального рассмотрения физики пробоя.

Дальнейший расчет вероятности попадания в ту или иную область при этом требует численного моделирования. Так как стохастичность процесса уже учтена при задании вероятностного характера скачков пробивного напряжения (и соответствующей напряженности поля) то дальнейший алгоритм может быть детерминирован. Так, например, можно считать, что после случайного скачка напряженности активным оказывается тот стример, головка которого находится на минимальном расстоянии от головки нисходящего лидера. Он перехватывает его ориентировку и формирует длинную искру.

В этом алгоритме случайные скачки напряженности в локальной близости от возможных точек попадания могут считаться независимым. Однако, даже в этом случае алгоритм требует многократного численного пересчета длин стримеров и достаточно сложен. Поэтому наиболее приемлемым методом оценки такой вероятности является натурный эксперимент с масштабным макетом.

В силу геометрического подобия полей, возникающих при одинаковых (на макете и на объекте) относительных скачках напряженности, изолинии  $E_{cr}$  также окажутся подобны. А это означает, что совпадут и относительные длины стримеров, генерируемых этими скачками. Поэтому относительные вероятности попадания молнии в различные области будут также совпадать для макета и объекта.

*Пробой в плоскую поверхность.*

На рис. 4 показаны результаты макетного эксперимента, в котором исследовалась стохастичность мест попадания длинной искры в плоскую поверхность.

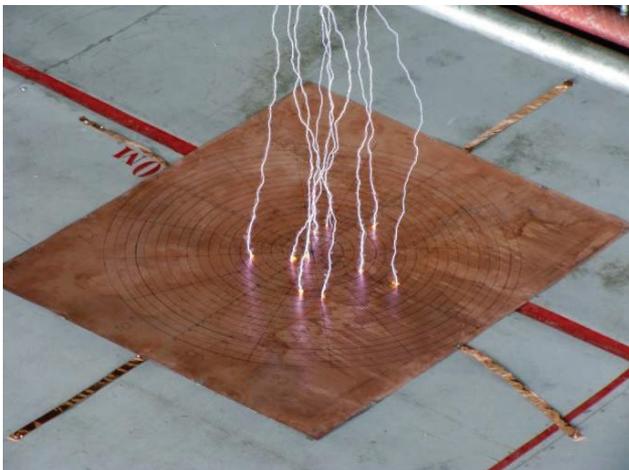


Рис. 4. Результаты предварительного эксперимента по определению функции распределения мест попадания длинной искры в плоскую поверхность

В этом эксперименте варьируется высота расположения конца электрода над плоской поверхностью. На него подается плавно повышающееся напряжение и фиксируется точка попадания длинной искры в нижний плоский электрод. Как видно из рисунка, полученные результаты позволяют (при достаточно большом количестве испытаний) определить функцию распределения  $\omega_h(U_f; \vec{r}_i)$  для каждой из высот  $h(\vec{r}_{st})$  расположения конца верхнего электрода.

Специфика проводимого эксперимента заключается в том, что для плоской поверхности все возможные точки попадания находятся в равных условиях, а распределение напряженности электростатического поля над поверхностью может быть задано аналитически (при известных значениях  $U_f$  и  $h$ ). Используя это выражение для связи случайных параметров пробоя  $E_{r0} = E_{cr}$  и  $r_0(E_{cr})$ , мы можем, как проверить адекватность используемой стохастической модели (5), так и определить ее параметры  $E_{cr}$  и  $\sigma_{JE}^2$  из эксперимента.

Решаем электростатическую задачу. Считаем, что головка нисходящего лидера, обладающая зарядом  $q$ , находится на высоте  $h$  над бесконечной проводящей плоскостью. Тогда, методом электростатических изображений рассчитываем невозмущенное поле около плоскости:

$$E_r = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \frac{h}{(h^2 + r^2)^{3/2}}, \quad (7)$$

где  $r$  – расстояние в горизонтальной плоскости от точки симметрии. Вводим величину  $\omega(E)ds$  – вероятность того, что за единицу времени на участке площадью  $ds$  за счет флуктуаций будет достигнуто поле  $E$ . Предполагаем, что это распределение – гауссово (за постоянным коэффициентом перед гауссоидой дальше следить не будем, поскольку для результата будут важны только соотношения вероятностей).

$$\omega(E) \propto \exp -\frac{(E - E_r)^2}{\sigma^2} . \quad (8)$$

Для небольшого участка поверхности в точке  $r$  площадью  $ds$  вероятность того, что поле в ней превысит пороговое значение  $E_{cr}$ , пропорционально интегралу

$$\rho_r(E > E_{cr}) = \int_{E_{cr}}^{\infty} \omega(E) dE \propto \text{erfc} \frac{E_{cr} - E_r}{\sigma} , \quad (9)$$

где  $\text{erfc}(x)$  – дополняющая функция ошибок.

Разобьем всю поверхность на концентрические кольца ширины  $dr$  вокруг центральной точки. Вероятность того, что за малый интервал времени от  $t$  до  $t + dt$  точка пробоя окажется в этом кольце, пропорциональна произведению вычисленной выше вероятности на площадь кольца, а значит, зависимость этой плотности вероятности от  $r$  имеет вид:

$$d\rho(r) \propto r \times \text{erfc} \frac{E_{cr} - E_r}{\sigma} dt , \quad (10)$$

где  $E_r$  подставляется из формулы (7).

Пусть  $P_0(t)$  – вероятность того, что к моменту времени  $t$  не произошло ни одного пробоя. Тогда вероятность пробоя в кольцо  $dr$  за все время равна

$$P(r) = \int_0^\infty P_0(t) d\rho(r) = \int_0^\infty P_0(t) \times r \times \operatorname{erfc} \frac{E_{cr} - E_r}{\sigma} dt. \quad (11)$$

Как видим, независящая от времени часть выносятся из-под интеграла, а оставшаяся, по определению, дает интеграл единицу. Таким образом, финальное выражение для вероятности пробоя на расстоянии  $r$  от центра имеет тот же вид, что и плотность этой вероятности за единицу времени (10), а коэффициент пропорциональности определяется из нормировки плотности вероятности:  $\int_0^\infty P(r) dr = 1$ . Сравнивая последнее выражение с результатами эксперимента, подбираем параметры  $E_{cr}$  и  $\sigma$ .

Заметим, что входящий в формулу (7) параметр высоты заряда  $h$  соответствует конечному положению нисходящего лидера, после которого, в соответствии с нашим предположением, возникает встречный лидер, определяющий ориентацию нисходящего лидера. Но в рассматриваемом случае на любой из высот напряженности между электродами повышают до возникновения пробоя.

Для достаточно большой высоты  $h' > h$  нисходящий лидер возникает до того, как напряженность поля на поверхности пластины превысит критическую хотя бы в одной точке. До этого момента его движение хаотично, но не зависит от текущего положения головки. Если случайное отклонение от вертикали за один скачок не зависит от высоты его расположения над плоским электродом, то отклонение от центра описывается формулой случайных блужданий (двумерного броуновского движения).

$$\rho(x(z)=x) \propto e^{-\frac{x^2}{2\sigma_0^2(h'-h)}}; \quad \rho(y(z)=y) \propto e^{-\frac{y^2}{2\sigma_0^2(h'-h)}}. \quad (12)$$

Здесь изначально в качестве аргумента функций входило время движения  $t$ , но, предполагая в среднем постоянную скорость вертикального движения стримера, заменяем его на путь  $\Delta h = (h' - h)$  нисходящего лидера до той высоты  $h$ , на которой происходит «выбор» точки попадания.

Следовательно, дисперсия (среднеквадратичное отклонение от центра) координаты начального хаотического движения лидера рассчитывается по законам броуновского движения, и является линейным:

$$D_0(z) = \langle r(\Delta h)^2 \rangle = \langle x(\Delta h)^2 \rangle + \langle y(\Delta h)^2 \rangle = 4\sigma_0^2(\Delta h). \quad (13)$$

Тогда все выражения для распределения вероятности выходной точки встречного стримера остаются справедливыми, но отсчитываются от смещенного с такой дисперсией центра координат (поскольку все параметры задачи однородны в плоскости). Независимость этих двух смещений, по законам суммирования случайных величин, означает независимость и обычное суммирование их дисперсий:

$$D(h) = 4\sigma_0^2(h'-h) + D_1, \quad (14)$$

где  $h'$  – высота расположения конца верхнего электрода,  $h$  – высота расположения головки нисходящего лидера, на которой происходит «выбор» точки попадания,  $D_1$  – дисперсия конечной траектории стримера, определяющаяся из формулы (11). Поэтому зависимость дисперсии распределения точек попадания искры от высоты расположения конца электрода должна иметь вид смещенной от начала координат линейной функции, по наклону и смещению которой можно определить параметры  $\sigma_0^2$  и  $(4\sigma_0^2 h + D_1)$ .

Поскольку точность вычисления дисперсии на каждой высоте определяется количеством измерений, на практике эта зависимость будет линейной только приближенно, и должна быть интерполирована. Характерный вид такой экспериментальной зависимости показан на рис. 5. Более точный анализ параметров модели будет сделан после проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Используя априорно заданное значение  $E_{cr} = 4,65$  кВ/см, можно оценить параметры  $\sigma_0^2$ ,  $h$  и  $D_1$  для распределений (11) и (12).

При оптимально подобранных значениях стохастической модели погрешности определения этих параметров могут быть определены путем сравнения экспериментальных и теоретических зависимостей ширины распределения точек попадания от высоты верхнего электрода. Таким образом, проведенный эксперимент и анализ его результатов позволяет подтвердить адекватность используемых в модели приближений и оценить погрешность, связанную с этими приближениями.

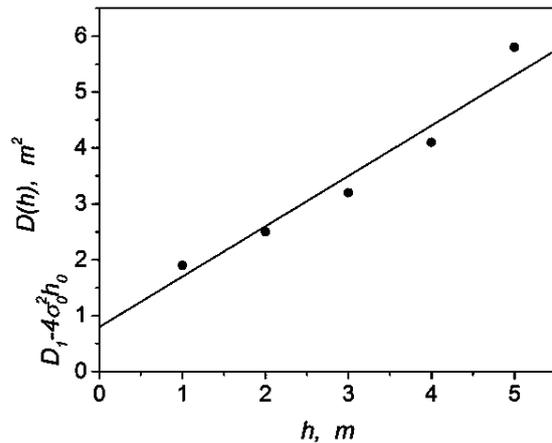


Рис. 5. Иллюстративный график возможных результатов эксперимента для определения параметров модели

Рассмотренный выше эксперимент не в полной мере отражает используемую нами модель пробоя, так как напряженность электростатического поля растет по мере удаления от плоского электрода. В связи с этим, возникший в той или иной точке поверхности стример (при выполнении условия  $E(\vec{r}_i) \geq E_{cr}$ ) далее

уже не затухает и идет на сближение с нисходящим лидером. Поэтому концепция случайной длины стримера в этой модели теряет свою актуальность.

В связи с этим мы рассмотрели также модель пробоя в две близко расположенные конструкции. В этом случае уже не удастся получить простое аналитическое выражение для напряженности электростатического поля. Поэтому мы использовали результаты численного счета, полученные в пакете COMSOL 3.5aAC/DC (лицензия № 9601339).

На рис. 6, а показана геометрия рассчитываемой системы электродов. Она соответствует эксперименту, описанному в [3, рис. 5.5]. На рис. 6, б показано распределение изолиний напряженности электростатического поля в этой системе.

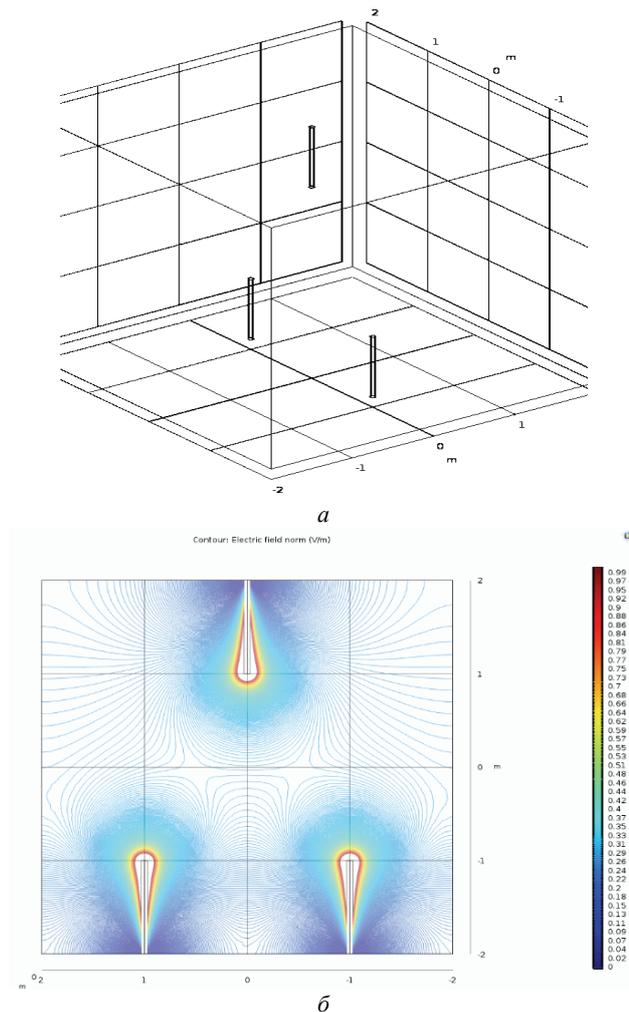


Рис.6. Геометрия рассчитываемой системы электродов- (а); распределение изолиний напряженности электростатического поля в этой системе – (б)

На рис. 7 представлены соответствующие иллюстрации для аналогичного расположения электродов с расстоянием 10 см между ними.

В соответствии с разработанной моделью полагаем, что:

– на остриях нижних электродов под воздействием внешнего поля возникает высокая напряженность, которая приводит к образованию стримерной «по-

душки»;

– длина этих стримеров является случайной величиной, которая определяется напряженностью поля  $E_{cr} = 4,65$  кВ/см;

– в отсутствии флуктуаций решение электростатической задачи дает нам границу концов стримеров;

– если средняя напряженность между концом стримера и верхним электродом превышает пороговое значение  $E_0$  (согласно [7]  $E_0 = 5,00$  кВ/см), происходит финальная стадия пробоя («finaljump»);

– при наличии флуктуаций напряженности электростатического поля (описано выше) положение концов стримеров и образует «облако» вероятных точек;

– для первого из стримеров, между концом которого и верхним электродом окажется выполнено условие «finaljump», происходит «выбор» и дальнейшие стадии пробоя (включая возможное образование встречного лидера, его сближение с нисходящим лидером в реальной молнии).

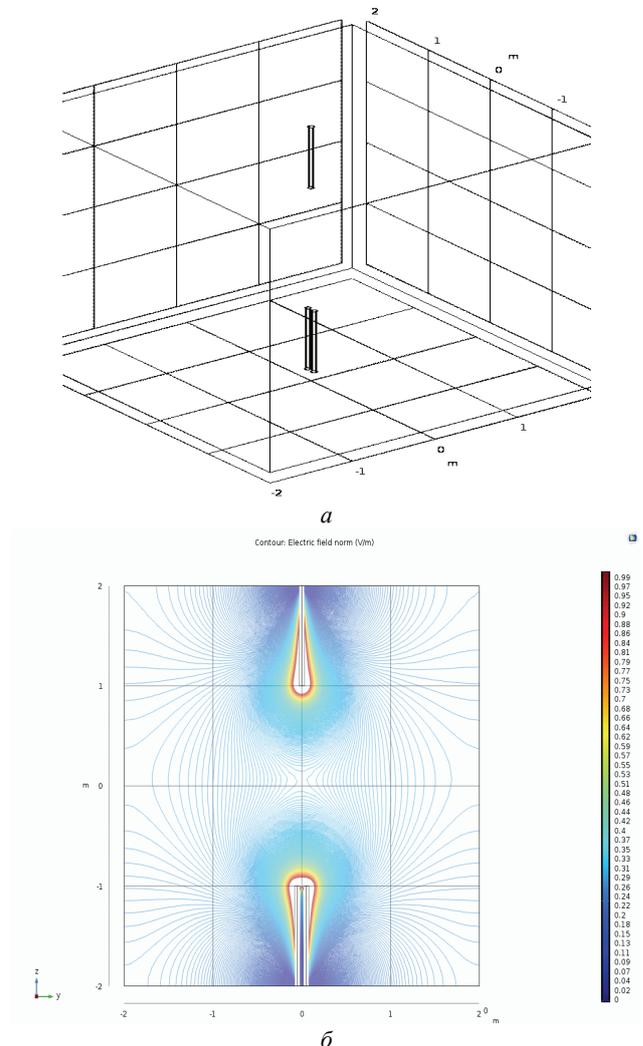


Рис. 7. Геометрия рассчитываемой системы электродов (расстояние 10 см) – (а); распределение изолиний напряженности электростатического поля в этой системе – (б)

Точный расчет вероятностей пробоя при различных напряжениях и сравнение с экспериментом требуют разработки специального алгоритма и его про-

граммирования. Это планируется сделать на следующем этапе исследований.

Источниками погрешностей при проведении макетного моделирования могут служить несколько факторов:

- погрешности, связанные с неполным соответствием физических процессов, происходящих при пробое молнии и искры в макетном эксперименте;
- погрешности экспериментального определения вероятностей на макете;
- погрешности оценки численных параметров, входящих в используемую модель;
- погрешности математических вычислений, необходимых для получения окончательного результата макетирования.

Проанализируем каждый из этих источников погрешности по отдельности.

*Погрешности, связанные с неполным соответствием физических процессов, происходящих при пробое молнии и искры в макетном эксперименте*

Это основной источник погрешностей, о неизбежности которого было сказано выше. Тем не менее, вносимая им погрешность может быть оценена и сведена к минимуму выбором оптимальных параметров моделирования. В описанной выше методике проведения эксперимента такими параметрами являются:

- высота расположения плоскости конца верхнего электрода;
- характерное время нарастания напряжения на электроде;
- выбор максимального значения напряжения, обеспечивающего 50 % или 90 %-й или др. пробой межэлектродного пространства.

Как следует из анализа соответствия физических процессов, связанных с пробоем молнии или длинной искры, основной стадией пробоя, влияющей на погрешность моделирования, является стадия «выбора» нисходящим лидером встречного лидера и их последующей ориентировки.

Для оценки степени соответствия этой стадии в реальной молнии и модели (и связанной с этим величиной погрешности) предлагается следующая методика:

- сбор экспериментальных данных (или использование ранее полученных данных) вероятности попадания молнии в наземную конструкцию;
- моделирование этой конструкции и ее масштабного макета в среде COMSOL 3.5.a;
- проведение экспериментальных исследований распределения вероятности попадания длинной искры на макете;
- оптимизация параметров модели для наилучшего совпадения расчетных данных с экспериментальными:
  - для реальной конструкции,
  - для макета;
- оценка погрешности, вызванной перенесением параметров модели, полученных для макета, на мо-

дель реального объекта.

Фактически, эта методика позволяет предсказать, насколько данные макетных исследований (после их математической обработки и адаптации параметров) можно будет использовать для предсказания вероятности попадания молнии в реальный объект (для которого оптимальные параметры модели нам неизвестны).

По предварительным (качественным) оценкам эта погрешность не будет превышать разброса пробивных напряжений (5-10 %). Окончательная оценка погрешностей этого рода будет проведена после получения необходимых экспериментальных результатов.

*Погрешности экспериментального определения вероятностей на макете*

Этот источник погрешностей связан с параметрами точности аппаратуры, используемой при измерениях и количеством испытаний, необходимых для оценки вероятности.

Для оценки этого количества будем полагать, что разброс значений количества попаданий в ту или иную область макета описывается нормальным распределением. Тогда при среднем количестве попаданий пробоя в  $i$ -ю область  $\bar{N}_i = \omega_i N$  флуктуацию этого количества можно оценить, как  $\delta N_i \approx \sqrt{\bar{N}_i}$ . Ошибка в расчете вероятности  $\omega_i$  при такой флуктуации составит  $\delta \omega_i = \frac{\delta N_i}{N} = \left( \sqrt{\omega_i} \right) \frac{1}{\sqrt{N}}$ .

Если, например, вероятность попадания в «защищенные» части наземных конструкций  $\omega_i$  не должна превышать 1%, то для оценки этой вероятности с точностью, не хуже  $\delta \omega_i = 10\%$  необходимо зафиксировать не менее  $N'$  случаев пробоя в наземную конструкцию, где  $10^{-3} = \sqrt{10^{-2}} \frac{1}{\sqrt{N'}}$ , откуда  $N' \approx 10^2$ .

*Погрешности оценки численных параметров, входящих в используемую модель*

Ранее показана возможность экспериментально-теоретической оценки погрешностей параметров модели. Используя формулы (7-14) мы можем оценить и влияние этих погрешностей на точность окончательного результата (оценки вероятностей пробоя молнии в ту или иную зону).

*Погрешности математических вычислений, необходимых для получения окончательного результата макетирования*

В рамках предложенной методики расчета использованы как результаты численного моделирования (модели в пакете COMSOL 3.5a), так и аналитические расчеты. Так как мы ограничиваемся решением электростатической задачи и последующим расчетом стационарных вероятностных распределений, компьютерных ресурсов (оперативной памяти и т.п.) достаточно, чтобы обеспечить необходимую точность этих вычислений. Их погрешность должна быть на порядок меньше наибольшей из остальных погрешностей, чтобы ее вкладом можно было пренебречь.

Окончательная оценка погрешности макетных

экспериментов и последующего их пересчета на реальный объект будет проведена после получения необходимых экспериментальных данных.

Проанализированы проблемы согласования существующих моделей различных стадий развития молниевоего разряда при макетных испытаниях.

Показано, что модели развития молнии и длинной искры можно согласовать по отдельности для трех стадий:

- этап движения головки верхнего лидера до начала образования встречных лидеров;
- этап «ориентации» движения головки верхнего лидера за счет притяжения зарядами встречных лидеров;
- этап окончательного пробоя между сближившимися головками встречных лидеров («finaljump»).

Разработана модель распределения положения головки нисходящего лидера до стадии «выбора и захвата».

Обосновано подобие масштабного макетирования разряда молнии на стадии ориентировки нисходящего лидера одним из восходящих.

Разработана методика адаптации макетного эксперимента в рамках вероятностной модели.

Проанализированы результаты предварительных экспериментальных исследований для двух случаев:

- пробой в плоскую поверхность;
- пробой в близко расположенные конструкции.

Проанализированы источники погрешностей при макетном моделировании вероятности пробоя и предложены методы их оценки.

В дальнейшем, планируется разработка численно-аналитических алгоритмов адаптации результатов макетного эксперимента для получения вероятностного распределения пробоя молнии на реальной конструкции.

1. Базелян Э. М., Райзер Ю. П., Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией [The mechanism of lightning attraction and the problem of lightning initiation by lasers]. УФН, 170:7 (2000). С. 753–769.

2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. Москва, изд-во МФТИ, 1997. 320 с.

3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. Москва: Физматлит, 2001. 320 с.

4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Москва: Изд-во Интеллект, Долгопрудный, 2009.

5. Молния и молниезащита / Александров Г. Н.; отв. ред. Козлов Г. Н.; Рос. акад. наук, Институт электрофизики и электроэнергетики. Москва: Наука, 2008, 274 с.

6. Lightning Electromagnetics. Vernon Cooray. The Institution of Engineering and Technology; 1st edition (June 12, 2012). 976 p.

7. Rakov V.A., Uman M.A. Review and evaluation of lightning returnstroke models including some aspects of their application. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998; **40** (4). PP. 403–26.

8. Rachidi F., Rakov V.A., Nucci C.A. Bermudez J.L. The effect of vertically-extended strike object on the distribution of current along the lightning channel. Journal of Geophysical Research, 2002; **107** (D23). P. 4699.

9. Podgorski A.S., Landt J.A. Numerical analysis of the lightning-CN tower interaction. 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland, 1985.

10. Heidler F., Zundl T. Influence of tall towers on the return stroke current. Presented at Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity. Williamsburg, VA, 1995.

11. Baba Y., Ishii M. Numerical electromagnetic field analysis of lightning current in tall structures. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001; **16** (2). PP. 324–328.

12. Kordi B., Moini R., Janischewskyj W., Hussein A., Shostak V., Rakov V.A. Application of the antenna theory model to a tall tower struck by lightning. Journal of Geophysical Research, 2003; **108** (D17).

13. Harrington R.F. Field Computation by Moment Methods. New York: IEEE & Wiley, 1993.

14. Visacro S., Silveira F.H. Evaluation of lightning current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model. Journal of Electrostatics, 2004. **60**. PP. 111–120.

15. Silveira F.H., Visacro S., De Conti A.R. Lightning effects on the vicinity of elevated structures. International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, 2004.

16. Zundl T. Lightning current and LEMP calculations compared to measurements gained at the Peissenberg tower. 22nd International Conference on Lightning Protection, Budapest, Hungary, 1994.

17. Guerrieri S., Heidler F., Nucci C.A., Rachidi F., Rubinstein M. Extension of two return stroke models to consider the influence of elevated strike objects on the lightning return stroke current and the radiated electromagnetic field: comparison with experimental results. EMC '96 ROMA. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Univ. Rome 'La Sapienza', Rome, Italy. 1996. Vol. 2.

18. Guerrieri S., Nucci C.A., Rachidi F., Rubinstein M. On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents. IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. **13** (4). PP. 1543–1555.

19. Guerrieri S., Krider E.P., Nucci C.A. Effects of traveling-waves of current on the initial response of a tall Franklin Rod. International Conference on Lightning Protection, Rhode, Greece, 2000. 908 Lightning electromagnetics.

20. Rusan I., Janischewskyj W., Hussein A.M., Chang J.-S. Comparison of measured and computed electromagnetic fields radiated from lightning strikes to the Toronto CN tower. 23rd International Conference on Lightning Protection, Florence, 1996.

21. Motoyama H., Janischewskyj W., Hussein A.M., Rusan R., Chisholm W.A., Chang J.S. Electromagnetic field radiation model for lightning strokes to tall structures. IEEE Transactions on Power Delivery. 1996. **11** (3). PP. 1624–1632.

22. Rachidi F., Janischewskyj W., Hussein A.M., Nucci C.A., Guerrieri S., Kordi B. et al. Current and electromagnetic field associated with lightning return strokes to tall towers. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2001. **43** (3). PP. 356–367.

23. Janischewskyj W., Shostak V., Hussein A.M. Comparison of lightning electromagnetic field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower 1. Magnetic field. 24th International Conference on Lightning Protection, Birmingham, UK, 1998.

24. Janischewskyj W., Shostak V., Hussein A.M. Lightning electric field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower. 11th International Symposium on High Voltage Engineering. 1999. Vol. 467, no. 5. PP. 270–74.

25. Shostak V., Janischewskij W., Hussein A., Kordi B. Electromagnetic fields of lightning strikes to a tall tower: a model that accounts for upwardconnecting discharges. 25th International Conference on Lightning Protection. Rhodes, Greece, 2000.

26. Shostak V., Janischewskij W., Hussein A.M., Chang J.S., Kordi B. Returnstroke current modeling of lightning striking a tall tower accounting for reflections within the growing channel and for upward-connecting discharges. 11th International Conference on Atmospheric Electricity. Guntersville, AL, 1999.

27. Goshima H., Asakawa A., Shindo T., Motoyama H., Wada A., Yokoyama S. Characteristics of electromagnetic fields due to winter lightning stroke current to a high stack. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. Part B, 2000. **120** (1). PP. 44–49.

28. Bermudez J.L., Rubinstein M., Rachidi F., Heidler F., Paolone M. Determination of reflection coefficients at the top and bottom of elevated strike objects struck by lightning. Journal of Geophysical Research. 2003. **108** (D14). P. 4413.

29. Bermudez J.L., Rachidi F., Janischewskij W., Shostak V., Rubinstein M., Pavanello D. et al. Far-field – current relationship based on the TL model for lightning return strokes to elevated strike objects. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. **47** (1). PP. 146–159.

30. Baba Y., Rakov V.A. Lightning electromagnetic environment in the presence of a tall grounded strike object. Journal of Geophysical Research. 2005. **110**.

31. Rachidi F., Nucci C.A. On the Master, Uman, Lin, Standler and the modified transmission line lightning return stroke current models. Journal of Geophysical Research. 1990. **95** (D12). PP. 20389–20394.

#### References (transliterated)

1. Bazeljan Je. M., Rajzer Ju. P. Mehanizm pritzazhenija molniii problema lazernogo upravlenija molnijej [The mechanism of lightning attraction and the problem of lightning initiation by lasers]. Phys. Usp., 43: 7 (2000). PP. 701–716.

2. Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Iskrovoy razrjad. Moscow, izd-vo MFTI, 1997. 320 p.

3. Bazeljan Je.M., Rajzer Ju.P. Fizika molniii molniezashhity. Moscow: Fizmatlit, 2001. 320 p.

4. Rajzer Ju. P. Fizika gazovogo razrjada. Moscow: Izdatel'stvo Intellect, Dolgoprudnyj, 2009.

5. Molnija I molniezashhita / Aleksandrov G. N.; otv. red. Kozlov V. N.; Ros. akad. nauk, Institut jelektrofizikii jelektrojenergetiki. Moscow: Nauka, 2008. 274 p.

6. Lightning Electromagnetics. Vernon Cooray. The Institution of Engineering and Technology; 1st edition (June 12, 2012) 976 p.

7. Rakov V.A., Uman M.A. Review and evaluation of lightning returnstroke models including some aspects of their application. IEEE Transactionson Electromagnetic Compatibility. 1998. **40** (4). PP. 403–426.

8. Rachidi F., Rakov V.A., Nucci C.A., Bermudez J.L. The effect of vertically-extended strike object on the distribution of current along the lightning channel. Journal of Geophysical Research, 2002. **107** (D23). P. 4699.

9. Podgorski A.S., Landt J.A. Numerical analysis of the lightning-CN tower interaction. 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility. Zurich, Switzerland, 1985.

10. Heidler F., Zundl T. Influence of tall towers on the return stroke current. Presented at Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity. Williamsburg, VA, 1995.

11. Baba Y., Ishii M. Numerical electromagnetic field

analysis of lightning current in tall structures. IEEE Transactions on Power Delivery. 2001. **16**(2). PP. 324–328.

12. Kordi B., Moini R., Janischewskij W., Hussein A., Shostak V., Rakov V.A. Application of the antenna theory model to a tall tower struck by lightning. Journal of Geophysical Research. 2003. **108** (D17).

13. Harrington R.F. Field Computation by Moment Methods. New York: IEEE & Wiley, 1993.

14. Visacro S., Silveira F.H. Evaluation of lightning current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model. Journal of Electrostatics. 2004. **60**. PP. 111–120.

15. Silveira F.H., Visacro S., De Conti A.R. Lightning effects on the vicinity of elevated structures. International Conference on Lightning Protection. Avignon, France, 2004.

16. Zundl T. Lightning current and LEMP calculations compared to measurements gained at the Peissenberg tower. 22nd International Conference on Lightning Protection. Budapest, Hungary, 1994.

17. Guerrieri S., Heidler F., Nucci C.A., Rachidi F., Rubinstein M. Extension of two return stroke models to consider the influence of elevated strike objects on the lightning return stroke current and the radiated electromagnetic field: comparison with experimental results. EMC '96 ROMA. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Univ. Rome 'La Sapienza', Rome, Italy. Vol. 2, 1996

18. Guerrieri S., Nucci C.A., Rachidi F., Rubinstein M. On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents. IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. **13** (4). PP. 1543–1555.

19. Guerrieri S., Krider E.P., Nucci C.A. Effects of traveling-waves of current on the initial response of a tall Franklin Rod. International Conference on Lightning Protection. Rhode, Greece, 2000. 908 Lightning electromagnetics.

20. Rusan I., Janischewskij W., Hussein A.M., Chang J.-S. Comparison of measured and computed electromagnetic fields radiated from lightning strikes to the Toronto CN tower. 23rd International Conference on Lightning Protection, Florence, 1996.

21. Motoyama H., Janischewskij W., Hussein A.M., Rusan R., Chisholm W.A., Chang J.S. Electromagnetic field radiation model for lightning strokes to tall structures. IEEE Transactions on Power Delivery. 1996. **11** (3). PP. 1624–1632.

22. Rachidi F., Janischewskij W., Hussein A.M., Nucci C.A., Guerrieri S., Kordi B. et al. Current and electromagnetic field associated with lightning return strokes to tall towers. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2001. **43** (3). PP. 356–367.

23. Janischewskij W., Shostak V., Hussein A.M. Comparison of lightning electromagnetic field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower I. Magnetic field. 24th International Conference on Lightning Protection. Birmingham, UK, 1998.

24. Janischewskij W., Shostak V., Hussein A.M. Lightning electric field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower. 11th International Symposium on High Voltage Engineering. 1999. Vol. 467, no. 5. PP. 270–274.

25. Shostak V., Janischewskij W., Hussein A., Kordi B. Electromagnetic fields of lightning strikes to a tall tower: a model that accounts for upwardconnecting discharges. 25th International Conference on Lightning Protection. Rhodes, Greece, 2000.

26. Shostak V., Janischewskij W., Hussein A.M., Chang J.S., Kordi B. Returnstroke current modeling of lightning striking a tall tower accounting for reflections within the growing channel and for upward-connecting discharges. 11th International Conference on Atmospheric Electricity. Guntersville, AL,

1999.

27. Goshima H., Asakawa A., Shindo T., Motoyama H., Wada A., Yokoyama S. Characteristics of electromagnetic fields due to winter lightning stroke current to a high stack. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. Part B. 2000. **120** (1). PP. 44–49.

28. Bermudez J.L., Rubinstein M., Rachidi F., Heidler F., Paolone M. Determination of reflection coefficients at the top and bottom of elevated strike objects struck by lightning. Journal of Geophysical Research. 2003. **108** (D14). P. 4413.

29. Bermudez J.L., Rachidi F., Janischewskyj W., Shostak V., Rubinstein M., Pavanello D. et al. Far-field – current rela-

tionship based on the TL model for lightning return strokes to elevated strike objects. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. **47** (1). PP. 146–159.

30. Baba Y., Rakov V.A. Lightning electromagnetic environment in the presence of a tall grounded strike object. Journal of Geophysical Research. 2005. **110**.

31. Rachidi F., Nucci C.A. On the Master, Uman, Lin, Standler and the modified transmission line lightning return stroke current models. Journal of Geophysical Research. 1990. **95** (D12). PP. 20389–20394.

*Посмунула (received) 20.04.2019*

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

(*Князєв Володимир Володимирович*) кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник; м. Харків, Україна; ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7119-7790>; e-mail: [knyaz2@i.ua](mailto:knyaz2@i.ua).

(*Мельник Сергій Іванович*) – кандидат технічних наук, доцент, Інститут радіофізики та електроніки НАНУ імені О.Я. Усикова, старший науковий співробітник; м. Харків, Україна; e-mail: [smelnyk@yandex.ua](mailto:smelnyk@yandex.ua).

УДК 621.316.99

• • • • •

Напряга дотику є параметром, який характеризує електробезпеку обслуговуючого персоналу у випадку короткого замикання на території електроустановки чи поза її межами. Метою роботи є аналіз існуючих методів визначення напруги дотику для їх поточного контролю. Проведено аналіз світового та вітчизняного досвіду на основі порівняння експериментальних та розрахункових способів визначення нормованих параметрів заземлювального пристрою. Розглянуто метод короткого замикання, малого струму, кінцевих елементів в часовій області, інтегро-диференційних рівнянь та оптичної аналогії. Визначено сфери використання існуючих методів розрахунку напруги дотику. Показано, що розрахункові методи дозволяють врахувати більшу кількість факторів та напряму охопити понад 80 % діючих енергооб'єктів України. Отримані результати дозволяють обрати оптимальний метод контролю стану заземлювального пристрою. Усунення виявлених недоліків методів дозволить підвищити точність визначення нормованих, а отже підвищити надійність роботи електроустановок та безпеку персоналу.

: електробезпека, заземлювальний пристрій, напряга дотику, коротке замикання, енергооб'єкт.

• • • • •

Напряжение прикосновения является параметром, характеризующим электробезопасность обслуживающего персонала в случае короткого замыкания на территории электроустановки или за ее пределами. Целью работы является анализ существующих методов определения напряжения прикосновения для их текущего контроля. Проведен анализ мирового и отечественного опыта на основе сравнения экспериментальных и расчетных способов определения нормируемых параметров заземляющего устройства. Рассмотрен метод короткого замыкания, малого тока, конечных элементов во временной области, интегро-дифференциальных уравнений и оптической аналогии. Определены сферы использования существующих методов расчета напряжения прикосновения. Показано, что расчетные методы позволяют учесть большее количество факторов и направления охватить более 80% действующих энергообъектов Украины. Полученные результаты позволяют выбрать оптимальный метод контроля состояния заземляющего устройства. Устранение выявленных недостатков методов позволит повысить точность определения нормированных, а значит повысить надежность работы электроустановок и безопасность персонала.

: электробезопасность, заземляющего устройства, напряжение прикосновения, короткое замыкание, энергообъект.

© Д. Г. Коліушко, С. С. Руденко, С. Г. Буряковський, 2019

D.G.KOLIUSHKO, S.S. RUDENKO, S.G. BURYAKOVSKY

## ANALYSIS OF THE METHODS FOR DETERMINING THE TOUCH VOLTAGE OF THE EARTHING ARRANGEMENT OF EXISTING POWER PLANT

Touch voltage is a parameter characterizing the electrical safety of the staff in the event of a short circuit in the electrical installation area or outside it. The purpose of the work is to analyze existing methods for determining the contact voltage for their monitoring. The analysis of the world and domestic experience is based on a comparison of experimental and computational methods for determining the normalized parameters of earthing arrangement. The methods of short circuit, low current, finite elements in the time domain, integro-differential equations and optical analogy is considered. Determined the boundaries of application of existing methods for calculating touch voltage. It is shown that computational methods allow to take into account a greater number of factors and directions. They cover more than 80% of existing energy facilities in Ukraine. The results obtained allow to select the optimal method of monitoring the state of the earthing arrangement. The elimination of the identified deficiencies of the methods will improve the accuracy of the normalized parameters, and thus increase the reliability of the electrical installations and personnel safety.

**Keywords:** electrical safety, earthing arrangement, touch voltage, short circuit, power plant.

. Напруга дотику є параметром, який характеризує електробезпеку обслуговуючого персоналу енергооб'єкту. В Україні допустиме значення напруги дотику  $U_{\text{дот}}$  регламентується згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ) [1], в Європейському Союзі (ЄС) згідно BS EN 50522:2010 «Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c.» (Заземлення силових установок напругою понад 1 кВ) [2]. Вимоги ЄС у цілому відповідають національним вимогам Швейцарії «Verordnung über elektrische Starkstromanlagen» (Настанова щодо силових установок) [3] та «Erdungshandbuch Regelwerk: Technik Eisenbahn» (Інструкції для заземлення: Технологія залізниці) [4], а в Австрії – «Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V ~ und 1500 V = » (Будівництво електричних установок з номінальною напругою від 1000 В змінного струму та 1500 В постійного) [5].

Основними відмінностями вказаних нормативних документів [2–5] від вітчизняного [1], є те, що незалежно від способу виконання ЗП (за допустимим значенням напруги дотику чи опору ЗП) – чітко прописана необхідність визначення  $U_{\text{дот}}$ , а також існують деякі відмінності у залежності значення  $U_{\text{дот}}$  від часу спрацювання захисту (див. табл. 1). Необхідність контролю  $U_{\text{дот}}$  для ЗП, які спроектовані за вимогами до опору ЗП (п.1.7.106 ПУЕ), прописана неявно: в п.1.7.59 [1] вказано, що ЗП має забезпечувати електробезпеку персоналу.

Таблиця 1 – Гранично припустимі значення напруги дотику

Тривалість дії захисту, с	0,01	0,1	0,2	0,5	0,7	0,9	від 1,0 до 5,0
Напруга дотику згідно [1], В	500	500	400	200	130	100	65
Напруга дотику згідно [2], В	780	650	550	220	130	120	110-90
Напруга дотику згідно [3], В	700	700	380	150	100	80	78-50

Напруга дотику залежить від струму, який стікає з заземлювального пристрою (ЗП) в землю, опору ЗП, конструкції ЗП та електрофізичних характеристик

грунту. На відміну від опору ЗП, при якому амплітуда струму практично не грає ролі, напруга дотику їй пропорційна, хоча ця залежність і носить нелінійний характер [6].

Слід зазначити, що вітчизняні норми [1] мають дискретну диференціацію значення  $U_{\text{дот}}$ , яку наведено у вигляді таблиці, в той час як в [2, 3] наведені графіки, що дозволяє враховувати точні значення часу спрацювання. На рис. 1 наведено графік залежності припустимого значення напруги дотику від часу спрацювання захисту зі швейцарського нормативного документу [3].

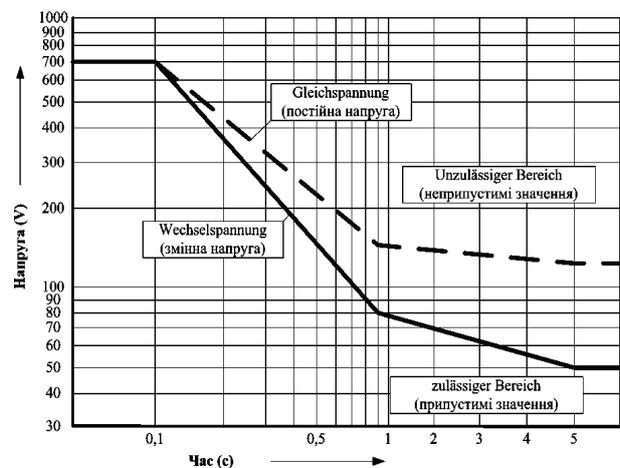


Рис. 1. Залежність припустимого значення напруги дотику від часу спрацювання захисту

Враховуючи, що напруга дотику є параметром, який характеризує електробезпеку людей та тварин, а її значення залежить від значної кількості факторів, вибір метода визначення напруги дотику є актуальною задачею.

є аналіз існуючих методів визначення напруги дотику для поточного контролю безпеки експлуатації діючих енергооб'єктів.

. Методи визначення напруги дотику можна розділити на дві основні групи:

- експериментальні;
- розрахункові.

Існують два шляхи експериментального вимірювання напруги дотику. Перший – безпосередньо при струмі короткого замикання (КЗ), тобто у реальних умовах. У цьому випадку штучно на території підстанції чи за її межами створюється КЗ на землю й вимірюється напруга дотику. Перевагою такого методу є відсутність необхідності будь-яких розрахунків або математичного моделювання. Але суттєвий недолік полягає в тому, що метод є небезпечним як для обладнання, так і для персоналу. Вказаний метод може бути виправданим лише в поодиноких випадках у виключних ситуаціях при проведенні випробувань найбільш відповідальних ЗП при здачі об'єкту до експлуатації й не може використовуватися для поточного контролю стану ЗП.

Другий – при вимірювальному струмі (метод малого струму), який за величиною в багато разів менший ніж реальний струм КЗ з подальшим приведенням вимірної напруги дотику прямо пропорційно співвідношенню вимірювального струму до реального струму КЗ [7].

На рис. 2 наведена схема вимірювання напруги дотику за допомогою генератора змінного струму та вольтметра. Потенційний електрод Р має імітувати дві ступні людини. Для цього використовують спеціальний електрод з контактною поверхнею  $25 \times 25 \text{ см}^2$ . Для створення надійного контакту електрода з землею, на нього встановлюється вантаж вагою не менше 25 кг. Вольтметр шунтується резистором з опором  $R_n$ , який має дорівнювати опорі тіла людини (як правило він приймається рівним 1000 Ом). Горизонтальна відстань від місця контакту до пластини приймається рівним 0,8 м [1] або 1 м [3].

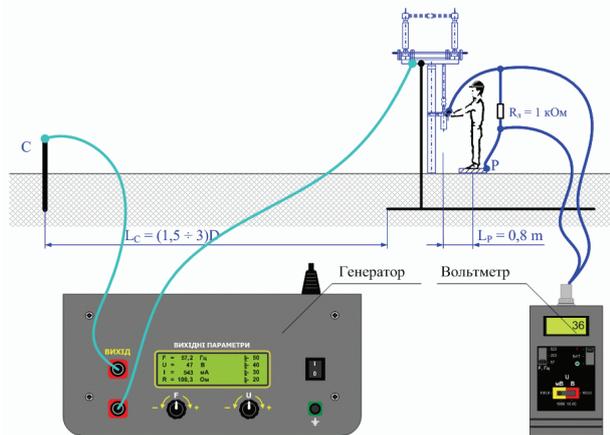


Рис. 2. Схема вимірювання напруги дотику

Струмивий електрод (С) розташовують на відстані 1,5–3 діагоналі ЗП (D). Така відстань була прийнята для еквівалентного однорідного ґрунту [7]. Генератор під'єднують до обладнання та електроду С, а вольтметр включають між потенційним електродом та обладнанням. Для моделювання найбільш несприятливих сезонних умов місце установки потенційного електроду зволожується. Після чого на схему подається напруга й виконуються виміри напруги та струму. Виміряні значення напруги дотику приводять до реального струму КЗ згідно (1) й порівнюють отриманий результат з припустимим нормованим значенням:

$$U_{\text{дот}} = U_{\text{вим.}} \cdot \frac{I_{\text{КЗ}}}{I_{\text{вим.}}}, \quad (1)$$

де  $U_{\text{вим.}}$  та  $I_{\text{вим.}}$  – вимірні значення напруги та струму;  $I_{\text{КЗ}}$  – значення струму КЗ електроустановки.

Недоліком такого способу є неможливість проведення вимірювань в умовах щільної забудови та методична похибка способу, яка пов'язана з неврахуванням нелінійної залежності магнітної проникності матеріалу заземлювачів від струму, що протікає елементами ЗП.

Крім того, в [7] показано, що для коректного вимірювання напруги дотику та опору ЗП необхідно, щоб відстань до струмового електроду була не меншою за (3–40) діагоналей ЗП в залежності від значень електрофізичних характеристик двошарового ґрунту [7], а для тришарового ґрунту така залежність взагалі в літературі відсутня. Зрозуміло, що таке рознесення вимірювальних кіл в багатьох випадках буде неможливим, тому доцільно визначати  $U_{\text{дот}}$  одним з розрахункових способів.

Питанням моделювання електромагнітних процесів, що виникають в ЗП при протіканні аварійних струмів присвячена низка робіт [7–12]. В більшості випадків використовується математична модель ЗП, розташованого в двошаровому ґрунті (зокрема, за допомогою [7] проведено розрахунок для понад 1000 енергооб'єктів України класами напруги 35–750 кВ, а програмний комплекс [9] на її основі, є одним з найпопулярніших у світі комерційних версій).

Розрахунок ЗП виконується, як правило, у двох режимах: КЗ на території енергооб'єкту та за його межами. Для визначення напруги дотику використовуються наступні розрахункові методи:

- метод кінцевих елементів в часовій області (т.з. FDTD-метод);
- метод інтегро-диференціальних рівнянь;
- метод оптичної аналогії.

Кожен з зазначених методів має схожий алгоритм, який в загальному вигляді можна представити у вигляді блок-схеми (див. рис. 3). При цьому для кожного з методів принципово відрізняється лише блок польової задачі, який буде проаналізовано окремо. Тому доцільно розглянути спочатку спільні блоки.

При розрахунку напруги дотику ЗП підстанції розглядають як систему зі штучних заземлювачів та заземлювальних провідників, кожен з яких виконаний зі сталевих прямолінійних електродів круглого або прямокутного поперечного перерізу з питомим опором  $\rho_{\text{ст}}$  та відносною магнітною проникністю  $\mu$  ґрунту, у якому розташований ЗП, розглядається у вигляді багат шарового напівпростору, що проводить електричний струм.

Розрахунок здійснюється за наступним алгоритмом: у блоці вихідних даних відбувається введення геометричних та електричних даних (розміри ЗП, роз-

ташування, глибина залягання та переріз заземлювачів, величина струму КЗ, електрофізичні характеристики ґрунту, питомий електричний опір матеріалу заземлювача тощо). Далі відбувається розрахунок повздовжніх активних та індуктивних опорів зв'язків і визначаються коефіцієнти системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) для розрахунку густини струмів, що стікають з заземлювача. Зважаючи на складну залежність опору матеріалу електродів від величини струму, що протікає по них, вирішення задачі знаходиться методом послідовних наближень.



Рис. 3. Алгоритм визначення напруги дотику розрахунковим методом

Оскільки у реальних умовах кожне з'єднання між окремими вузлами представляє собою провідник з відповідними електричними параметрами  $Z$ , ЗП представляють у вигляді схеми заміщення [7]. Шляхом вирішення СЛАР одним з ітераційних методів, наприклад Зейделя, визначається значення густини стікаючого в землю струму з кожного електроду заземлювача в залежності від потенціалів цих електродів.

Далі, у відповідності з використовуваним методом, вирішується польова задача.

Для початкового наближення задаються однаковим значенням потенціалу в усіх вузлах  $\phi$ , наприклад "1". Вирішуючи систему рівнянь, знаходять густини

струмів  $j_i$ , які стікають з вузлів в землю. Визначенням  $j_i$  завершується вирішення польової задачі на першій ітерації.

На другому етапі визначаються потенціали вузлів сітки ЗП на основі вирішення ланцюгової задачі. Після обчислення густини струмів, які стікають з елементів заземлювача, визначаються характеристики елементів електричної схеми заміщення ЗП. Результатом роботи процедури є двомірний масив комплексних повних опорів гілок схеми заміщення та одномірний масив струмів, який використовується в якості правих частин СЛАР. Схема заміщення ЗП містить  $p$  гілок та  $q$  вузлів. Так як для реальних ЗП, як правило,  $p$  значно більше  $q$ , тому визначення потенціалів вузлів ЗП виконують методом вузлових потенціалів. У деяких вузлах схеми струми задані (у нейтралях силових трансформаторів підстанції та місцях КЗ). Методика побудови та вирішення ланцюгової задачі методом вузлових потенціалів у загальному вигляді описана в курсі електротехніки, а при застосуванні для визначення НП ЗП у [7]. Слід відзначити, що при цьому використовується сума повних провідностей усіх гілок, які приєднані до відповідного вузла. Для цього розглядається активний опір гілки змінному струму, внутрішня індуктивність гілки, пов'язана з магнітним потоком усередині провідника та зовнішня індуктивність гілки, пов'язана з магнітним потоком поза провідником. Вказані параметри визначаються у відповідності з геометричними параметрами заземлювача.

Результатом вирішення СЛАР, наприклад методом Гауса, є матриця-стовпець комплексних значень потенціалу у вузлах електричної схеми заміщення ЗП.

На наступній ітерації отримані значення потенціалів вузлів підставляються до системи рівнянь та визначаються нові значення густини струмів, які стікають з заземлювача в землю. Ітераційний процес продовжується, поки потенціал у вузлах на попередній ітерації буде відрізнятися не більше ніж на задану величину, наприклад,  $1 \cdot 10^{-3}$ .

Далі розраховується напруга дотику в заданих вузлах [7]:

$$U_{\text{к дот}} = \left| U_{k0} - \varphi_{0,8} \right| \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{л}} + R_0}, \quad (2)$$

де  $U_{k0}$  – потенціал  $k$ -го вузла ЗП;  $\varphi_{0,8}$  – потенціал на поверхні землі, визначений на відстані 0,8 м від  $k$ -го вузла;  $R_{\text{л}}$  – опір тіла людини 1000 Ом [1, 2];  $R_0$  – опір розтікання стуму з двох ніг людини при дотику, (опір потенційного електроду відносно ЗП).

Розглянемо особливості вирішення польової задачі в межах кожного методу.

(... **FDTD** ...) є сітковим методом розв'язання польових задач шляхом дискретизації рівнянь Максвелла у диференціальній формі [8]. При проведенні розрахунків задається розрахункова область, крок сітки та граничні умови. FDTD-метод дозволяє проводити розрахунки для заземлювачів будь-якого поперечного перерізу, враховувати як горизонтальну, так і

вертикальну неоднорідність ґрунту будь-якої складності (враховує анізотропність і нелінійність середовища), визначати розподіл потенціалів при протіканні струмів КЗ та удару блискавки й враховувати електродинамічні зусилля, що виникають в ЗП.

Недоліками при практичному використанні FDTD-методу є:

– відсутня практична можливість визначення горизонтальної неоднорідності на території діючого енергооб'єкту;

– необхідність дискретизації розрахункового об'єму та величезна кількість вузлів, оскільки лінійні розміри ЗП на 3–5 порядків перевищують переріз заземлювачів, які визначають крок сітки [8];

– необхідність збільшення області розрахунку при відносно великій відстані від ЗП, по якому протікає струм.

Перелічені недоліки звужують сферу застосування вказаного методу до розрахунку одиночних заземлювачів або природних заземлювачів (фундаментів) для вирішення теоретичних задач, а не поточного контролю напруги дотику на діючих енергооб'єктах з розвинутою заземлювальною сіткою.

базується на аналітичному вирішенні задачі про потенціал електричного поля точкового джерела струму (ТДС) [12]. Програми засновані на вказаному методі використовуються для проведення розрахунку провідними науково-дослідними установами світу відповідно до міжнародних стандартів IEEE Std. 80 та 81 [10]. При цьому розповсюдження отримали два способи представлення ґрунту за кількістю шарів геоелектричної структури у вигляді:

- двошарового провідного напівпростору;
- тришарового провідного напівпростору.

Математична модель ЗП, розташованого у двошаровому ґрунті дозволяє напряму (тобто без використання методу еквівалентування ґрунту) охопити до 10 % діючих енергооб'єктів України [12], а в інших випадках може давати істотну похибку (від 20 % до 100 %). Це пов'язано з похибкою, що виникає внаслідок використання методу еквівалентування з приведенням багатошарової структури до двошарової розрахункової моделі.

Математична модель ЗП, розташованого у тришаровому ґрунті, дозволяє напряму охопити близько 80 % діючих енергооб'єктів України, визначати потенціал на ЗП з похибкою до 10 %, а порівняння з експериментальним значенням напруги дотику показало понад 90 % потрапляння в розрахунковий діапазон [12].

У цьому методі кожен  $i$ -тий електрод ЗП розглядається у вигляді множини елементарних ТДС, які розміщені на його осі. Густина струму такого джерела представляється у вигляді лінійної залежності (3):

$$j_i(\ell_i) = j_i^{\text{beg}} + (j_i^{\text{end}} - j_i^{\text{beg}}) \frac{\ell_i}{L_i}, \quad (3)$$

де  $j_i^{\text{beg}}$  та  $j_i^{\text{end}}$  – густини струму в початковому та

кінцевому вузлах  $i$ -того електроду відповідно;  $\ell_i$  – відстань уздовж  $i$ -того електроду, визначена від його початкового вузла;  $L_i$  – довжина  $i$ -того електроду.

Початковий та кінцевий вузли електроду призначаються довільно та у подальшому не змінюються. Методом суперпозиції визначається результуюче електричне поле цих джерел у точці спостереження  $P$ . Для обчислення невідомих  $j_i$  точка  $P$  розташовується по черзі у кожному з підземних вузлів ЗП. В результаті складається СЛАР відносно  $j_i$ .

Метод дозволяє проводити розрахунки з високою точністю для ЗП, розташованому в дво- та тришаровому ґрунті та найменшою тривалістю серед існуючих, заземлювачі можуть мати довільну орієнтацію у просторі, а ЗП – будь-яку складність та розміри. Тому метод інтегро-диференційних рівнянь найбільш поширеним, як при проектуванні, так і при поточному контролі напруги дотику ЗП діючих енергооб'єктів всіх класів напруги.

Недоліками методу є неможливість врахування:

- горизонтальної неоднорідності ґрунту;
- реального поперечного перерізу заземлювачів (тому використовується приведення прямокутної форми до еквівалентного кола відповідного радіусу);
- чотири- та більше шарової геоелектричної структури ґрунту.

Усунути останній недолік дозволяє

Замість точкового джерела струму в багатошаровому ґрунті розглядається точкове джерело світла в системі частково прозорих дзеркал [7, 9, 11]. Розглядаючи траєкторію променя можна визначити положення точкових джерел струму в однорідному середовищі.

Основним недоліком побудованих на основі методу оптичної аналогії математичних моделей ЗП, що розташовані у  $n$ -шаровому ґрунті, [11] є те, що кількість вузлів у подібній моделі збільшується в  $(2n + 1)$  разів, що призводить до обмеження можливості їх застосування в зв'язку зі значним зростанням тривалості розрахунку. Також відомою є математична модель побудована на основі модифікованого методу оптичної аналогії з використанням методу Проні для тришарового ґрунту [12], проте і вона є в три рази повільнішою, ніж розрахунок за допомогою методу інтегро-диференційних рівнянь [6, 7]. Крім того, зберігаються всі інші недоліки методу інтегро-диференційних рівнянь.

Порівняння методів інтегро-диференційних рівнянь з методом оптичної аналогії або його модифікації з використанням методу Проні показує, що останні мають значно більший час розрахунку. Наприклад, розрахунок всіх режимів короткого замикання для підстанції при кількості вузлів схеми заземлювального пристрою 7500, становитиме для математичних моделей на основі:

- аналітичного рішення для тришарового ґрунту – 15000 хв.;
- методу оптичної аналогії для тришарового ґрунту (розрахункова кількість вузлів схеми, а відповідно

і час, збільшиться в  $(2n + 1)$  разів, де  $n$  – кількість шарів ґрунту) – 105000 хв.;

– модифікованого методу оптичної аналогії з використанням методу Проні для тришарового ґрунту (розрахункова кількість вузлів схеми й час збільшиться в три рази) – 45000 хв.

Таким чином, найбільш універсальним методом визначення напруги дотику є метод інтегродиференційних рівнянь з урахуванням тришарової структури ґрунту, який дозволяє охопити 80 % діючих енергооб'єктів України. Для інших випадків (чотири та більше шарів ґрунту) більш пріоритетним є використання модифікованого методу оптичної аналогії, однак в цьому випадку час розрахунку збільшується в 12 разів, тому цей метод доцільно використовувати для ЗП відносно невеликих розмірів (наприклад, з діагоналлю до 100 м). Альтернативним варіантом для чотиришарових ґрунтів є використання методу еквівалентування (для приведення багатошарового ґрунту до вигляду тришарової розрахункової моделі) у сукупності з методом інтегродиференційних рівнянь.

1. Проведений в роботі аналіз показав, що експериментальне визначення значення напруги дотику на діючих енергооб'єктах при реальних або імітаційних струмах КЗ можливе лише при наявності вільного місця навколо об'єкту довжиною (1,5–40) діагоналей ЗП в залежності від значень електрофізичних характеристик ґрунту, що суттєво знижує сферу використання експериментального методу.

2. Недоліком експериментального методу є неможливість проведення вимірювань в умовах щільної забудови та методична похибка, яка пов'язана з неврахуванням залежності магнітної проникності матеріалу заземлювачів від струму, що протікає елементами ЗП.

3. Проведений аналіз дозволив визначити сферу використання існуючих методів розрахунку напруги дотику. Встановлено, що метод кінцевих елементів може використовуватися для вирішення теоретичних задач розрахунку одиночних заземлювачів, а найбільш універсальним є метод інтегродиференційних рівнянь, який дозволяє охопити 80 % діючих енергооб'єктів України. При наявності чотирьох та більше шарів ґрунту більш пріоритетним є використання модифікованого методу оптичної аналогії доцільно використовувати для ЗП відносно невеликих розмірів.

1. Правила улаштування електроустановок. Харків: Форт, 2017. 760 с. (Національний стандарт України).

2. BS EN 50522:2010. Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c. London : BSI, 2012. 104 p. (Міжнародний стандарт ЄС).

3. Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung). Bern : Der Schweizerische Bundesrat, 2016. 34 s. (Національний стандарт Швейцарії).

4. Erdungshandbuch Regelwerk: Technik Eisenbahn. D RTE 27900. Bern : Verband öffentlicher Verkehr, 2014. 49 s.

5. Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V ~ und 1500 V =. Teil 1: Begriffe und Schutz

gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen). (ÖVE/ÖNORM E 8001-1). Vienna : Österreichisches Normungsinstitut, 2010. 138 s. (Національний стандарт Австрії).

6. Коліушко Д. Г., Руденко С. С. Аналіз методів контролю стану заземлювальних пристроїв діючих енергооб'єктів на сучасному етапі. Електротехніка і Електромеханіка. 2019. № 1. С. 69–74. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.11

7. Колиушко Д. Г. Совершенствование диагностики заземляющих устройств электроэнергообъектов : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Харків, 2003. 172 с.

8. Коровкин Н. В., Шишигин С. Л. Расчетные методы в теории заземления. Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та. 2013. № 1. С. 74-79.

9. Tabatabaei N. M., Mortezaei S. R. Design of grounding systems in substations by ETAP intelligent software. International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». 2010. № 1. P. 45-49.

10. IEEE Std 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York. IEEE, 2000. 200 p. (міжнародний стандарт).

11. Шишигин С. Л. Разработка методов анализа и синтеза электромагнитных полей электротехнических устройств с сильными токами: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.05. Санкт-Петербург, 2010. 217 с.

12. Коліушко Д. Г., Руденко С. С. Експериментальне обґрунтування методики розрахунку нормованих параметрів заземлювального пристрою на основі тришарової моделі ґрунту. Електротехніка і електромеханіка. 2018. № 1. С. 66-70. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.11.

## References (transliterated)

1. Pravyla ulashtuvannja elektroustanovok [Electrical Installation Regulations]. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr)

2. BS EN 50522:2010. Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c. London : BSI, 2012. 104 p.

3. Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung). Bern : Der Schweizerische Bundesrat, 2016. 34 p. (De).

4. Erdungshandbuch Regelwerk: Technik Eisenbahn. D RTE 27900. Bern : Verband öffentlicher Verkehr, 2014. 49 p. (De)

5. Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis 1000 V ~ und 1500 V =. Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen). (ÖVE/ÖNORM E 8001-1). Vienna: Österreichisches Normungsinstitut, 2010. 138 s. (De).

6. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Analysis of methods grounding systems monitoring of existing energy objects at the present day. Elektrotechnika i elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics. 2019. No. 1, pp. 69–74. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.11

7. Koliushko D.G. Improving the diagnosis of grounding devices elektroenergoobektov: author's abstract of Can. tech. sci. diss: 05.11.13. Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet Kharkivskiy Polytekhnichnyi Instytut. Kharkiv. 2003. 172 p. (Rus)

8. Korovkin N.V., Shishigin S.L. Computational methods in the theory of grounding. Nauchno-tehnicheskie ведомosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. 2013. No. 1. PP. 74–79. (Rus)

9. Tabatabaei N.M., Mortezaei S.R. Design of grounding systems in substations by ETAP intelligent software. International Journal on «Technical and Physical Problems of Engineering». 2010. № 1. P. 45-49.

10. IEEE Std 80-2000 Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York. : IEEE, 2000. 200 p. (міжнародний стандарт).

11. Shishigin S.L. Development of methods for the analysis and synthesis of electromagnetic fields of electrical devices with high currents: author's abstract of Dr. tech. sci. diss: 05.09.05. Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet. Sankt-Peterburg. 2010. 217 p. (Rus)

12. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Experimental substan-

tiation of the calculation procedure of normalized parameters of grounding device based on the three-layer soil model Elektro-technika i Elektromechanika – Electrical Engineering & Electromechanics. 2018. No. 1. P. 66-70. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.11.

Надійшла (received) 24.04.2019

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

(*Koliushko Denys*) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3112-4260> e-mail: [denny4791@kpi.kharkov.ua](mailto:denny4791@kpi.kharkov.ua)

(*Rudenko Serhii*) – кандидат технічних наук, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут "Молнія" Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник; м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-2544-1545>; e-mail: [nio5\\_molniya@ukr.net](mailto:nio5_molniya@ukr.net)

(*Buryakovskiy Serhii*) – доктор технічних наук, професор, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут "Молнія" Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», директор; м. Харків, Україна; <http://orcid.org/0000-0003-2469-7431>; e-mail: [ergbyr@i.ua](mailto:ergbyr@i.ua)

УДК 621.313.33 : 629.423.31

• • • , • • • , • • •

-80

Електровозы ВЛ-80 работают в транспортной системе Украины с 1979 года. В электровозах этой серии используются тяговые двигатели постоянного тока последовательного возбуждения, та реостатно-контактная система регулирования скорости. Электрооборудование электровоза морально устаревшее, а система регулирования не является энергоэффективной. Проблема коллекторного тягового привода уже решена научными школами отечественных ученых. Современные подходы к качеству и скорости перевозок требует необходимость использования асинхронных двигателей в качестве тяговых вместе с преобразователем частоты. Много что сделано по техническому переоснащению железных дорог на основе электрификации, автоматизации, телемеханики, комплексной механизации, вычислительной и микропроцессорной техники. Переоснащаются также и локомотивы с использованием более экономичных и более надежных электрических приводов.

: электрический привод, поезд, двигатель, математическая модель, преобразователь, асинхронный двигатель.

• • • , • • • , • • •

-80

Электровозы ВЛ-80 работают в транспортной системе Украины с 1979 года. В электровозах этой серии используют тяговые двигатели постоянного тока последовательного возбуждения, и реостатно-контактную систему регулирования скорости. Электрооборудование электровоза морально устаревшее, а система регулирования не является энергоэффективной. Проблема коллекторной тягового привода уже решена научными школами отечественных ученых. Современные подходы к качеству и скорости перевозок требует необходимость использования асинхронных двигателей в качестве тяговых вместе с преобразователем частоты. Много что сделано по техническому переоснащению железных дорог на основе электрификации, автоматизации, телемеханики, комплексной механизации, вычислительной и микропроцессорной техники. Переоснащаются также и локомотивы с использованием более экономичных и более надежных электрических приводов.

: электрический привод, поезд, двигатель, математическая модель, преобразователь, асинхронный двигатель.

**A. OZULU, O. KRASILNIKOV, O. BOCHEVAR**

**RESEARCH OF MODERNIZED ELECTRIC DRIVE ELECTRIC LOCOMOTIV VL-80**

Electric locomotives VL-80 offers transport systems of Ukraine since 1979. In electric circuits, quest trains and possibilities for the construction of the afterglow and rheostat-contact control system. Electrical locomotives are morally stuck, and the control system is not energy efficient. The problem of a full-length traction drive in schools of natural sciences. A manual for the city and the city,

© А.Б. Озулу, О.О. Красильников, О.Г. Бочевар, 2019

which requires multiple use of asynchronous motors in the city, where there are various types of transport. At present, robotics in warehouse equipment, including optional, in upgraded models. The aim is to improve the traction characteristics of the electric locomotive. To achieve this goal the following tasks are set: creation of the model of the regular engine of the constant current of the sequential excitation with the system of step-by-step speed regulation; creation of an asynchronous motor model and frequency control; carrying out simulation of the VL-80 train movement with different types of traction drive. As a result, oscillograms of the linear velocity of the electric locomotion. On oscilloscopes it has been shown that due to the use of an asynchronous motor, the override of the drive motors significantly decreased, as well as the failure rates on the ascents decreased. With a full-time motor were obtained and the locomotive speed of the electric locomotive with an asynchronous motor.

**Keywords:** electric drive, train, engine, mathematic model, converter, asynchronous motor.

. Провідне місце в єдиній транспортній системі України займають залізниці. Вони мають найважливіше державне, народногосподарське і оборонне значення. Від залізниць потрібне своєчасне і повне задоволення потреб населення і народного господарства в перевезеннях. Будь-яка навіть короткочасна затримка виконання заявки на перевезення завдає збитку нормальній роботі підприємств, підриває довірливі основи господарювання. За останні роки на залізничному транспорті відбулися значні зміни в техніці, методах експлуатації і економіці. Багато що зроблено по технічному переоснащенню залізниць на основі електрифікації, автоматизації, телемеханіки, комплексної механізації, обчислювальної і мікропроцесорної техніки. Переоснащуються також і локомотиви з використанням більш економічних та більш надійних електричних приводів.

Модернізація тягового електроприводу електровозу, а саме запровадження тягових асинхронних двигунів дає можливість реалізувати на даному рухомому складі більш надійну систему керування для тягового привода. Це надає нам можливість суттєвого поліпшити умови роботи тягового електричного двигуна та заощадити електроенергію. Моделювання відбувалось в середовищі розробки Simulink пакета Matlab, який дозволяє отримати основні осцилограми руху потяга.

Метою є розробка методів підвищеної електромеханічної сумісності систем управління електричними колами електровозу, сигналізації і зв'язку.

Для досягнення зазначеної мети поставлено наступні задачі:

- створення моделі штатного двигуна постійного струму послідовного збудження зі штатною системою регулювання швидкості;
- створення моделі електровозу з асинхронним частотним електроприводом;
- проведення моделювання руху потяга ВЛ-80 з різними типами тягового приводу.

Практичне значення отриманих результатів для електротранспорту полягає в подальшому використанні отриманих даних для розрахунку руху потяга ВЛ-80 з різними типами електричних приводів по заданому шляху.

Рівняння механічних і електромеханічних характеристик у загальному вигляді однакові для всіх двигунів постійного струму:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{MR}{(K\Phi)^2}, \quad (1)$$

де  $U$  – напруга живлення двигуна;  
 $R$  – загальний активний опір обмоток двигуна;  
 $\omega$  – кутова частота обертання якоря двигуна;  
 $M$  – електромеханічний момент двигуна;  
 $\Phi$  – магнітний потік двигуна;  
 $K$  – конструкційний коефіцієнт двигуна.

Для побудови структурної схеми двигуна постійного струму послідовного збудження використовуємо систему рівнянь, які описують його роботу:

$$\begin{aligned} U_{я} &= L_{\Sigma} \frac{dI_{я}}{dt} + R_{\Sigma} \cdot I_{я} + E; \\ M_{дв} - M_{с} &= J \cdot \frac{d\omega}{dt}; \\ E &= K \cdot \Phi \cdot \omega; \\ M_{дв} &= K \cdot \Phi \cdot I_{я}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $U_{я}$  – напруга живлення двигуна;  
 $I_{я}$  – струм двигуна;  
 $R_{\Sigma}$  – загальний активний якорного кола;  
 $\omega$  – кутова швидкість обертання якоря двигуна;  
 $M_{дв}$  – електромеханічний момент двигуна;  
 $M_{с}$  – момент опору;  
 $\Phi$  – магнітний потік двигуна;  
 $K$  – електромеханічна стала двигуна;  
 $E$  – електрорушійна сила;  
 $L_{\Sigma}$  – загальна індуктивність якорного кола.

На основі системи рівнянь 2 складаємо структурну схему (рисунок 1):

На базі структурної схеми, а також використовуючи всі розраховані параметри будемо математичну модель двигуна постійного струму.

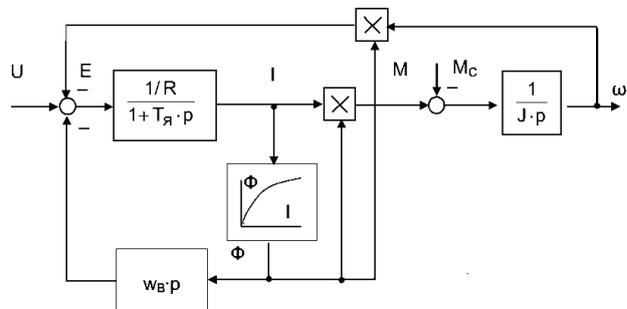


Рис. 1. Структурна схема двигуна постійного струму послідовного збудження

Закладений в асинхронний двигун принцип роботи дає ряд переваг цього пристрою:

- простий пристрій робить такий економічним у виробництві;
- низьке споживання енергії призводить до економічності пристроїв, оснащених таким двигуном;
- універсальність застосування в апаратах, де не потрібно точна підтримка частоти обертання або існує схема управління зі зворотним зв'язком, що забезпечує обертання із заданою частотою;
- висока надійність в роботі;
- асинхронний двигун може працювати при однофазному підключенні.

Тому, було обрано асинхронний двигун АД-914 вітчизняного виробництва, який має туж саму потужність та менші габаритні розміри, що дозволяє його впровадити у електровоз ВЛ-80.

При дослідженні динамічних режимів асинхронних двигунів використовуються двофазні математичні моделі, адекватно відображаючи процеси, що протікають в реальній машині. Найбільш загальною формою математичного опису двофазних моделей є система диференціальних і алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned}
 U_{os} &= \frac{d\psi_{os}}{dt} + r_s \cdot i_{os} + \psi_{\beta s} \cdot \omega_k; \\
 U_{\beta s} &= \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} + r_s \cdot i_{\beta s} - \psi_{os} \cdot \omega_k; \\
 U'_{or} &= \frac{d\psi_{or}}{dt} + r'_r \cdot i'_{or} + \psi_{\beta r} \cdot (\omega_k - \omega); \\
 U'_{\beta r} &= \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} + r'_r \cdot i'_{\beta r} - \psi_{or} \cdot (\omega_k - \omega); \\
 M \frac{3}{2} L_\mu \cdot A \cdot p \cdot (\psi_{os} \cdot \psi_{\beta r} - \psi_{\beta s} \cdot \psi_{or}); \\
 M - M_c &= \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt}; \\
 i_{os} &= A \cdot (\psi_{os} \cdot L'_r - \psi_{or} \cdot L_\mu); \\
 i_{\beta s} &= A \cdot (\psi_{\beta s} \cdot L'_r - \psi_{\beta r} \cdot L_\mu); \\
 i'_{or} &= A \cdot (\psi_{or} \cdot L'_r - \psi_{os} \cdot L_\mu); \\
 i'_{\beta r} &= A \cdot (\psi_{\beta r} \cdot L'_r - \psi_{\beta s} \cdot L_\mu).
 \end{aligned} \tag{3}$$

де  $\omega_k$  – швидкість обертання координатної ортогональної системи, в якій досліджується двофазна модель, а коефіцієнт А:

$$A = \left( \frac{1}{L'_S \cdot L'_R - L_\mu^2} \right). \tag{4}$$

Модель потягу складається з багатьох частин, пружньо і жорстко пов'язаних між собою. Тому рух поїзда по рейковому шляху можна представити з корисного переміщення уздовж осі шляху, що супроводжується обертанням коліс, якорів тягових двигунів,

елементів рушійних механізмів і різних коливальних рухів, що накладаються на нього. Розглянемо корисний рух і для цього представимо потяг як тверде тіло з масою  $m$  зосередженою в його центрі мас.

Рівняння руху поїзда визначає зв'язок в диференціальній формі між масою поїзда, його швидкістю, часом руху та діючими на поїзд силами:

$$(1 + \gamma) \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} = F(v) - W(v) - B(v), \tag{5}$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт, який враховує інерцію обертаючих частин;

- $m$  – маса потяга;
- $v$  – швидкість поїзда;
- $F(v)$  – характеристика сили тяги;
- $W(v)$  – опір руху потяга;
- $B(v)$  – гальмівна характеристика.

Рівняння руху поїзда можна вивести з виразу для його кінетичної енергії по теоремі Кеніга:

$$A_k = \frac{mv^2}{2} + \sum \frac{J_d \omega_d^2}{2} + \sum \frac{J_{\Pi} \omega_{\Pi}^2}{2} + \sum \frac{J_a \omega_a^2}{2}, \tag{6}$$

де  $A_k$  – кінетична енергія потяга;

- $m$  – маса потяга;
- $v$  – лінійна швидкість поїзда;
- $J_d, \omega_d$  – момент інерції і кутова швидкість рушійної колісної пари при застосуванні диференціальної передачі з пов'язаними з ними елементами рушійного механізму;
- $J_{\Pi}, \omega_{\Pi}$  – момент інерції і кутова швидкість підтримуючої колісної пари або коліс;
- $J_a, \omega_a$  – момент інерції і кутова швидкість якоря двигуна, включаючи частини передачі, укріплені на його валу.

Завдяки системам рівнянь (1,2,3,4,5,6), була побудована математична модель потяга ВЛ-80 зі штатним а асинхронним електричними приводами.

У результаті моделювання були отримані осцилограми лінійної швидкості та моменту двигуна потяга на ділянці з наступними радіусами кривих:

- 1 – 500 м;
- 2 – 800 м;
- 3 – 1200 м.

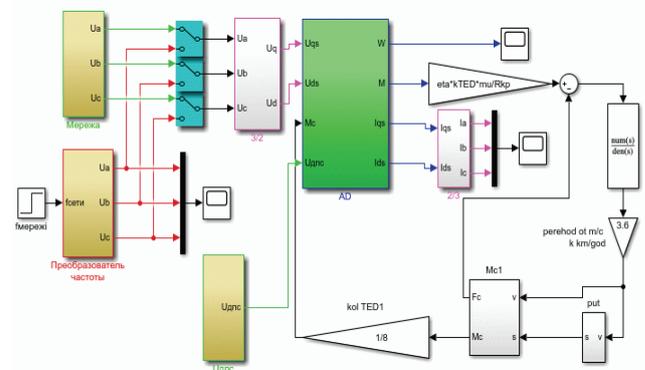


Рис. 2. Математична модель потяга ВЛ-80 зі штатним та асинхронним електричними приводами

Осцилограми руху потяга зі штатним та з асинхронним електричним приводом представлені на рис. 3 та рис. 4 відповідно.

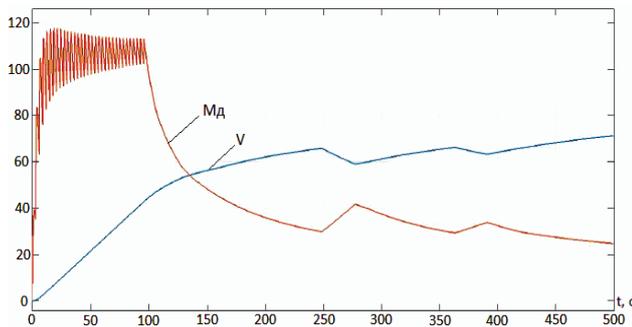


Рис. 3. Осцилограми руху потяга зі штатним електричним приводом

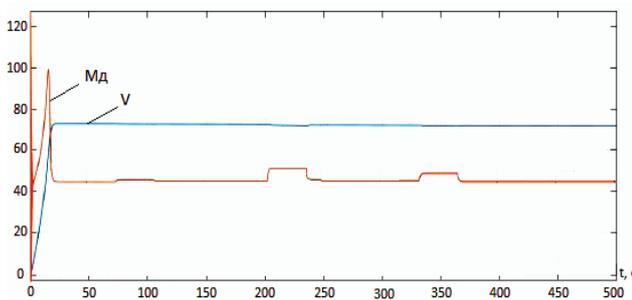


Рис. 4. Осцилограми руху потяга з асинхронним електричним приводом

З осцилограм видно, що при використанні асинхронного електричного привода лінійна швидкість потяга збільшилась на 5 км/год., та динамічна просадка швидкості при першому навантаженні зменшилась на 80 %.

. При проектуванні нового електровоза в якості базової конструкції обраний електровоз ВЛ-80. Завдяки впровадженню асинхронного електричного привода з частотним керуванням у електровозі ВЛ-80 можливо збільшити лінійну швидкість потяга на 5 км/год, що дозволить підвищити пропускну спроможність ділянки шляху. Також використання модернізованого електричного привода дозволить зменшити

коливання в механічній ланці потяга, що дозволить перевозити різні грузи, у тому числі й ті, що потребують більш жорстких вимог до умов перевезення.

1. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. Москва: Энергия, 1976. 616 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – Санкт-Петербург: КОРОНА-ВЕК, 2008. 368 с.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Москва: Транспорт, 1985. 287 с.
4. Ткачук В.И. Электромехатроника: підручник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. 440 с.
5. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1974. 567 с.
6. Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов / Степанов А.Д., Андерс В.И., Пречисский В.А., Гусевский Ю.И. Москва: Транспорт, 1982. 254 с.
7. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Ротанов Н.А., Курбасов А.С., Литовченко В.В., Быков Ю.Г. Москва: 1991. 336 с.
8. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. Москва: Энергия, 1964. 528 с.

#### References (transliterated)

1. Chilikin M.G., Klyuchev V.I., Sandler A.S. The theory of an automated electric drive. Moscow: Energia, 1976. 616 p.
2. Herman-Galkin S.G. Matlab& Simulink Designing mechatronic systems on a PC. Sankt-Petersburg: KORONA-VEK, 2008. 368 p.
3. Rules of traction calculations for train work. Moscow: Transport, 1985. 287 p.
4. Tkachuk V.I. Electromechanotronics : Textbook. Lviv: Publishing House of the National University "Lviv Polytechnic", 2006. 440 p.
5. Kovchin S.A., Sabinin Yu.A. Basics of electric drive. Sankt-Petersburg: Energoatomizdat, 1974. 567 p.
6. Electric transmission of alternating current of diesel locomotives and gas turbines. Stepanov A.D., Anders V.I., Prechissky V.A., Gusevsky Yu.I. Moscow: Transport, 1982. 254 p.
7. Electromotive force with asynchronous traction motors. Rotanov N.A., Kurbasov A.S., Litovchenko V.V., Bykov Yu.G. Moscow: 1991. 336 p.
8. White D., Woodson G. Electromechanical energy conversion. Moscow: Energia, 1964. 528 p.

Надійшла (received) 08.02.2019

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

(**Ozulu Anton Borisovich**) – магістр, Національний технічний університет «Харківський технічний інститут»; кафедра Електричного транспорту та тепловозобудування, м. Харків, Україна, e-mail: anton.ozulu96@gmail.com.

(**Krasilnikov Alexander Alexandrovich**) – магістр, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна, e-mail: kras0211@gmail.com.

(**Boechev Alexander Georgievich**) – магістр, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна, e-mail: shturman25@i.ua.

УДК 621.317.3

. . . , . . . , . . . , . . .

Розглянуто норми і методика вимірювань низькочастотних струмів радіоперешкод в проводах електроживлення обладнання військової техніки відповідно до вимог розділу NCE01 стандарту НАТО АЕСТР-500. Для реалізації цих випробувань створено експериментальний зразок струмоз'ємника. Представлена методика розрахункової оцінки параметрів струмоз'ємника. Конструктивні параметри експериментального зразка струмоз'ємника такі: число витків 20 на феритових кільцях марки 2000НН з габаритами: зовнішній діаметр 120 мм, внутрішній діаметр 80 мм, товщина 25 мм; вимірювальної кабель марки РК50-2-21 довжиною 3 м. Описана методика і результати розробки RL-інтегратора. Представлені результати експериментального визначення метрологічних характеристик струмоз'ємника. Визначено залежність коефіцієнта перетворення від частоти в діапазоні від 30 Гц до 100 кГц. На частотах понад 200 Гц коефіцієнт перетворення стабільний і дорівнює 20,8 дБ мкА/мкВ. Представлені результати використання струмоз'ємника при проведенні випробувань приладу БПВР-400-1, а також перевірена можливість його використання для інших видів вимірювань, зокрема, вимірювання гармонік струму приладу «Артон-08П».

: вимірювання, низькочастотні струми радіозавод, експериментальний зразок струмознімача.

. . . , . . . , . . . , . . .

Рассмотрены нормы и методика измерений низкочастотных токов радиопомех в проводах электропитания оборудования военной техники в соответствии с требованиями раздела NCE01 стандарта НАТО АЕСТР-500. Для реализации этих испытаний создан экспериментальный образец токосъемника. Представлена методика расчетной оценки параметров токосъемника. Конструктивные параметры экспериментального образца токосъемника такие: число витков 20 на ферритовом кольце марки 2000НН с габаритами: наружный диаметр 120 мм, внутренний диаметр 80 мм, толщина 25 мм; измерительной кабель марки РК50-2-21 длиной 3 м. Описана методика и результаты разработки RL-интегратора. Представлены результаты экспериментального определения метрологических характеристик токосъемника. Определена зависимость коэффициента преобразования от частоты в диапазоне от 30 Гц до 100 кГц. На частотах свыше 200 Гц коэффициент преобразования стабилен и равен 20,8 дБ мкА/мкВ. Представлены результаты использования токосъемника при проведении испытаний прибора БПВР-400-1, а также проверена возможность его использования для других видов измерений, в частности, измерения гармоник тока прибора «Артон-08П».

: измерение, низкочастотные токи радиопомех, экспериментальный образец токосъемника.

*JU. S. NEMCHENKO, I. P. L. SNIJ, A. I. SARAЕV, A.A. GUCHENKO*

### MEASURING LOW FREQUENCY CURRENTS

The norms and methods of measuring low-frequency currents of radio interference in the power supply wires of military equipment are considered in accordance with the requirements of the NCE01 section of the NATO AESTR-500 standard. To implement these tests created an experimental sample of the current collector. A method for calculating the current collector parameters is presented. The design parameters of the experimental sample of the current collector are as follows: the number of turns 20 on the ferrite ring of the brand 2000НН with dimensions: outer diameter 120 mm, inner diameter 80 mm, thickness 25 mm; measuring cable brand РК50-2-21 with a length of 3 m. The methodology and results of the development of the RL-integrator are described. The results of the experimental determination of the metrological characteristics of the current collector are presented. The dependence of the conversion coefficient on the frequency in the range from 30 Hz to 100 kHz is determined. At frequencies above 200 Hz, the conversion factor is stable at 20.8 dB  $\mu\text{A}/\mu\text{V}$ . The results of using the current collector during testing of the BPVR-400-1 device are presented, and the possibility of its use for other types of measurements, in particular, the measurement of current harmonics of the Arton-08P device, is also verified.

**Key words:** measurement, low frequency radio-current currents, experimental sample of current collector.

. В останні роки Україна постійно декларує бажання приєднатися до НАТО. І якщо це здійсниться, то Україні потрібно буде замінити своє озброєння на натівське. Маючи великий військово-промисловий потенціал, частину цього озброєння Україна буде сама розробляти та виготовляти. Для цього необхідно, щоб це озброєння відповідало усім стандартам НАТО, у тому числі і стандартам з електромагнітної сумісності (ЕМС).

Випробувальна лабораторія НДПКІ «Молнія» (ВЛ) акредитована на проведення випробувань з ЕМС приладів, які містять у собі електричні, електронні та радіовузли за багатьма міжнародними та регіональними стандартами з ЕМС, у тому числі і військовими стандартами СРСР. Маючи достатній досвід роботи за цими військовими стандартами та бажаючи розширити свою галузь акредитації на стандарти НАТО з ЕМС, ми провели аналіз цих стандартів з метою

з'ясування чим потрібно доукомплектувати ВЛ.

Всього ми проаналізували 2 стандарти з EMC: стандарт АЕСТР-250 [1] та стандарт АЕСТР-500 [2], та вирішили спочатку сконцентруватися на стандарті АЕСТР-500, який є більш актуальний на сьогоднішній день і який простіше реалізувати.

Аналіз стандарту АЕСТР-500 показав, що:

– він розповсюджується на озброєння усіх родів військ;

– у цьому стандарті прописано 25 видів випробувань, із яких 20 повинні проводитися у спеціалізованих лабораторіях, типу нашої ВЛ;

– всі випробування складаються з трьох частин: одна частина співпадає з випробуваннями за іншими стандартами і для їх проведення у нас є необхідне випробувальне та вимірювальне обладнання. Для реалізації другої частини можливо переорієнтувати вже діюче обладнання. Але шість видів випробувань і частково ще один відсутні у інших стандартах, і тому для них потрібне нове випробувальне та вимірювальне обладнання.

Одним з таких нових для нас видів є вимірювання низькочастотних струмів радіозавад у дротах електроживлення апаратури військової техніки за видом NCE01 [2]. Окремо потрібно сказати, що більшість випробувань на EMC (18 з 25) узяті з військового стандарту США MIL-STD-461F [3]. У стандарті [3] цей вид вимірювання має абревіатуру CE101. І тому у подальшому обладнання, яке буде зроблено за вимогою обох стандартів, може мати і абревіатуру за двома стандартами, наприклад, NCE01(CE101).

. Вимірювання низькочастотних струмів радіозавад у дротах електроживлення апаратури військової техніки за видом NCE01 проводяться за допомогою струмознімача (СЗ). Основою для його проектування є норми на рівні струмів радіозавад, які потрібно вимірювати (рис. 1)

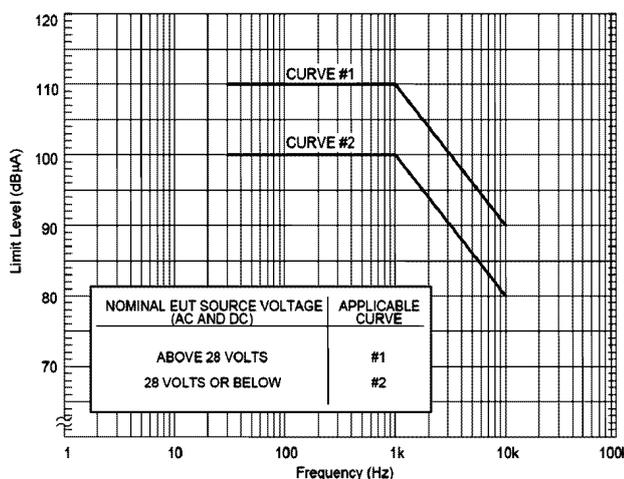


Рис. 1. Норми на рівні низькочастотних струмів радіозавад для бортового авіаційного обладнання за видом NCE01

З цього рисунка витікають метрологічні вимоги до СЗ.

– амплітудний діапазон, дБ мкА 60 – 130;

– частотний діапазон, кГц 0,03 – 100;  
 – похибка вимірювання, дБ (без регістратора) ± 1;  
 – реєстратор – селективний мікровольтметр.

Метод вимірювання низькочастотних струмів радіозавад наведено на рис. 2 [2, рис. NCE01-6].

Згідно з рис. 2 вимірювання цих струмів проводиться безконтактним методом за допомогою струмознімача індукційного типу.

Струмознімач індукційного типу (далі – СЗ-А-НЧ (СР-А-LF)) працює наступним чином:

– струми радіозавад ( $I_{P3}$ ), які потрібно вимірювати у дротах електроживлення, створюють навколо себе змінне магнітне поле кільцевого виду (рис. 3) з напруженістю  $H_{P3}$ , форма якого співпадає з формою  $I_{P3}$ , а амплітуда розраховується за формулою:

$$H_{P3} = \frac{I_{P3}}{2\pi r}, \quad (1)$$

де  $r$  – відстань від дроту зі струмом до силової лінії магнітного поля.

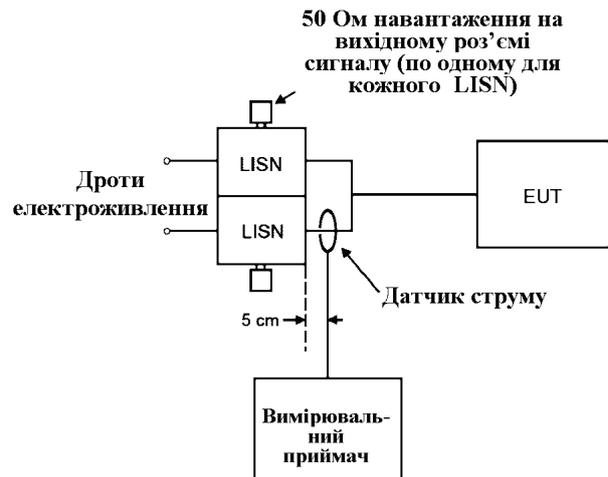


Рис. 2. Вимірювальна установка за методом NCE01:

EUT – прилад, який випробується;

LISN – еквівалент мережі

– якщо перпендикулярно до силової лінії магнітного поля розмістити котушку, то на кінцях цієї котушки виникає електрорушійна сила, яка розраховується за формулою (2):

$$e_{P3} = \mu_0 s w \frac{dH_{P3}}{dt} = \frac{\mu_0 s w}{2\pi r} \cdot \frac{dI_{P3}}{dt}, \quad (2)$$

де  $\mu_0 - 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$s$  – площа котушки ( $m^2$ );

$w$  – кількість витків.

Якщо струми, що вимірюються, мають синусоїдальну форму виду:

$$I_{P3} = I_m \sin \omega t, \quad (3)$$

– то формула (2) перетворюється у формулу (4):

$$e_{P3} = \frac{2 \cdot 10^{-7} s w}{r} \cdot \omega \cdot I_m \cdot \cos \omega t. \quad (4)$$

– таким чином, напруга на виході котушки, яка є вимірювальним перетворювачем (ВП), за формою збігається з формою вимірюваних струмів, а за амплітудою – пропорційна похідній від вимірюваних струмів.

– напруга на виході ВП лінійно залежить від частоти вимірюваних струмів, що незручно. Тому на практиці на виході ВП встановлюють пасивні інтегратори – RC (рис. 4) або RL (рис. 5) типів, на виході яких напруга буде пропорційна амплітуді вимірюваних струмів у діапазоні частот, при яких

$$T_i \geq \frac{10}{f},$$

де  $T_i$  – постійна інтегрування. Для RC-інтеграторів  $T_i(c) = R(O_M) \cdot C(\Phi)$ , а для RL-інтеграторів

$$T_i(c) = \frac{L(\Gamma_H)}{R(O_M)}.$$

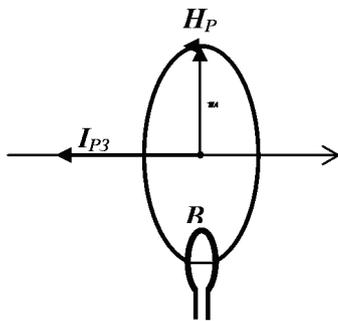


Рис. 3. Ілюстрація до методу вимірювання магнітного поля радіозавад

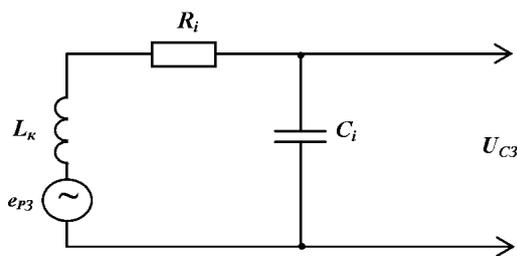


Рис. 4. Електрична схема струмознімача з RC-інтегратором:

- електрорушійна сила;
- $L_K$  – індуктивність ВП
- $R_i$  – інтегруючий резистор;
- $C_i$  – інтегруюча ємність;
- $U_{C3}$  – напруга на виході СЗ

– конструкція, яка складається з ВП та інтегратора, і буде струмознімачем (СЗ). Напруга ( $U_{C3}$ ) на виході СЗ розраховується за формулою (5):

$$U_{C3} = \frac{2 \cdot 10^{-7} s w}{r \cdot T_s} \cdot I_m \cdot \cos \omega t. \quad (5)$$

– одним з основних метрологічних показників СЗ є коефіцієнт перетворення ( $K_{П}$ ), який розраховується

за формулою:

$$K_{П} = \frac{I_m(A)}{U_{C3}(B)} = \frac{r \cdot T_s}{2 \cdot 10^{-7} \mu_r s w}. \quad (6)$$

– проведені розрахунки  $K_{П}$  показали, що для частотного діапазону за рис. 1 він буде дуже малий, і тому або на виході інтегратора потрібен підсилювач, або ВП потрібно конструювати з феритовим осердям. При конструюванні СЗ-А-НЧ (СР-А-LF) був прийнятий варіант з феритовим осердям;

– у якості феритового осердя прийнято феритове кільце марки 2000НН з габаритами: зовнішній діаметр 120 мм, внутрішній діаметр 80 мм, товщина 25 мм. Вибір такого кільця обумовлений тим, що у порожнечу кільця потрібно пропускати провід з вимірюваним струмом, причому цей провід може бути з роз'ємом. На практиці габарити роз'єму можуть досягати 50 – 60 мм.

– у цьому випадку максимальна напруга на виході СЗ розраховується за формулою.

$$U_{C3}^m = \frac{2 \cdot 10^{-7} \mu_r s w}{r \cdot T_s} \cdot I_m. \quad (7)$$

де  $\mu_r$  – магнітна проникність феритового кільця, яка може досягати декількох тисяч.

У такому разі коефіцієнт перетворення СЗ буде розраховуватись за формулою (6).

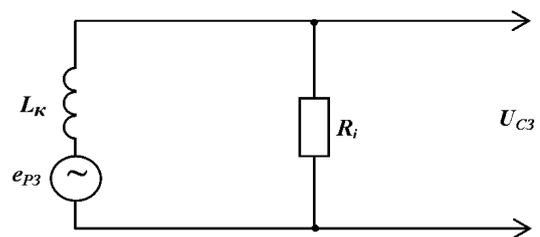


Рис. 5. Електрична схема струмознімача з RL-інтегратором:

- електрорушійна сила;
- $L_K$  – індуктивність ВП
- $R_i$  – інтегруючий резистор;
- $U_{C3}$  – напруга на виході СЗ

• Вибір конструктивних параметрів СЗ складається з двох основних розділів:

- вибір кількості витків та довжини вимірювального кабелю;
- вибір типу інтегратора.

• Для аналізу та вибору кількості витків було обрано конструкцію з феритовим кільцем, яке має  $\mu_r = 2000$ . З іншої сторони кожен виток у цьому разі має мінімальні габарити 40 мм х 25 мм, таким чином мінімальна площа –  $10^{-3} \text{ м}^2$ . При мінімальному струмі (60 дБ·мкА) та мінімальному сигналі (1 мкВ), який може зафіксувати селективний мікровольтметр,  $K_{П}$  повинен бути не менш ніж 1 дБ

(мкВ/мкА). Звідси при  $w = 1$   $U_{C3} = 0,08$  мкВ, що значно нижче чутливості мікрвольтметра. Тому у експериментальному зразку вибрано  $w = 20$ .

Другим фактором для вибору конструктивних параметрів СЗ є електричний резонанс у контурі СЗ (індуктивність  $L_K$  та ємність вимірювального кабелю), частота якого повинна бути вище 10 кГц, (а краще 100 кГц), що витікає з вимог до частотного діапазону СЗ. Експериментальні дослідження показали, що довжина вимірювального кабелю марки РК50 повинна бути не більш 5 м. У реальному зразку ця довжина 3 м.

Таким чином, остаточні конструктивні параметри експериментального зразку СЗ такі:  $w = 20$  на феритовому кільці марки 2000НН з габаритами: зовнішній діаметр 120 мм, внутрішній діаметр 80 мм, товщина 25 мм, та вимірювальний кабель марки РК50-2-21 довжиною 3 м.

. Постійна інтегрування обох видів інтеграторів повинна бути не менш 0,1 с. Для RC-інтегратора його елементи повинні бути  $R_i = 100$  кОм, а  $C_i = 1$  мкФ. Створення інтегратора з такими параметрами доволі складна задача, тому що треба компенсувати паразитні параметри елементів інтегратора. З іншого боку, RL-інтегратор не має таких вад. При цьому  $R_i$  може бути 50 Ом, що важливо для узгодження з вимірювальним трактом. Паразитні параметри цього резистора можна не враховувати.

Експериментальний зразок СЗ, створений за вищенаведеними розрахунками, наведено на рис. 6.

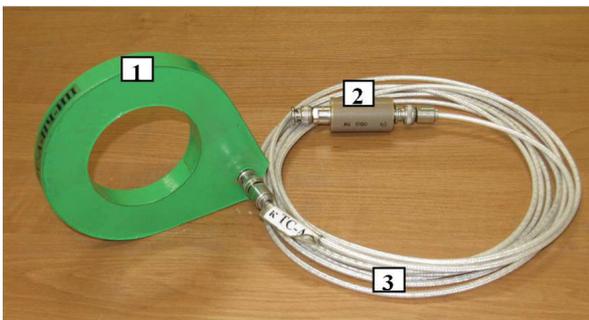


Рис. 6. Зовнішній вигляд експериментального зразка СЗ:

- 1 – вимірювальний перетворювач ВП в електростатичному екрані;
- 2 – інтегруючий резистор  $R_i$
- 3 – вимірювальний кабель, довжиною 3 м

. Ціллю цих робіт є експериментальне визначення коефіцієнта перетворення та його залежності від частоти та амплітуди випробувальних струмів.

Частотний діапазон – від 30 Гц до 10 кГц (з можливістю перевірки до 100 кГц).

Амплітудний діапазон – від 60 дБ мкА (1 мА) до 130 дБ мкА (3 А).

Для цього була створена випробувальна установка за рис. 7.

На рис. 8 наведена фотографія робочого місця, зібраного за рис. 7.

При встановленні метрологічних характеристик був визначений амплітудно-частотний діапазон, у якому амплітудна характеристика лінійна. Для виявлення цього діапазону були проведені вимірювання напруги на виході СЗ при випробувальних струмах 1 мА (60 дБ мкА), 10 мА (80 дБ мкА), 100 мА (100 дБ мкА), 1 А (120 дБ мкА), 2 А (126 дБ мкА), 3 А (130 дБ мкА), 4 А (132 дБ мкА), 5 мА (134 дБ мкА), 6 А (135,5 дБ мкА), 7 А (137 дБ мкА).

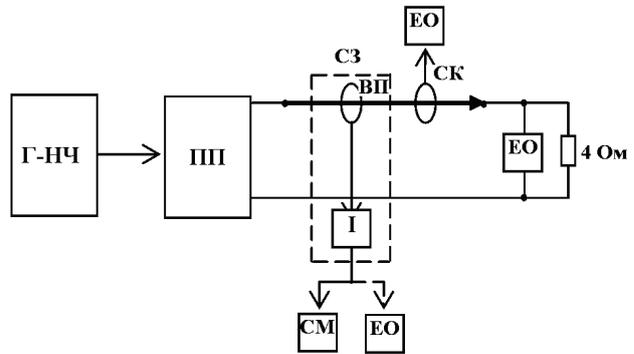


Рис. 7. Структурна схема випробувальної установки:

- Г-НЧ – генератор низьких частот;
- ПП – підсилювач потужності;
- СЗ – струмознімач;
- ВП – вимірювальний перетворювач;
- І – інтегратор;
- ЕО – осцилограф;
- СК – струмовимірювальні кліщі Fluke i3000s;
- СМ – селективний мікрвольтметр

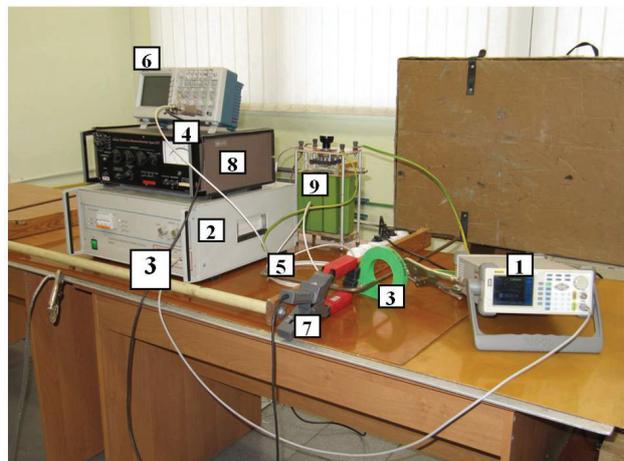


Рис. 8. Фотографія робочого місця для перевірки метрологічних характеристик експериментального зразка струмознімача:

- 1 – генератор низьких частот Rigol DG3121A;
- 2 – підсилювач потужності УМ-400;
- 3 – вимірювальний перетворювач;
- 4 – інтегратор;
- 5 – вимірювальний кабель;
- 6 – осцилограф Tektronix TDS 2024B;
- 7 – струмовимірювальні кліщі Fluke i3000s;
- 8 – селективний мікрвольтметр Unipan 237;
- 9 – навантаження 4 Ом

Вимірювання проводились на частотах від 30 Гц до 100 Гц з кроком 10 Гц, від 100 Гц до 1000 Гц з кро-

ком 100 Гц, від 1 кГц до 10 кГц з кроком 1 кГц, а також з метою визначення частоти обмеження були проведені вимірювання у діапазоні до 100 кГц.

Струми 1; 10; 100 мА вимірювались як падіння напруги на штатній навантазі 4 Ом за допомогою осцилографа Tektronix TDS 2024B, а напруга з виходу СЗ – селективним мікровольтметром Упіран 237.

Струми від 1 А до 7 А вимірювались за допомогою струмовимірювальних кліщів Fluke i3000s та осцилографа Tektronix TDS 2024B (перший канал), а напруга з виходу СЗ – осцилографа Tektronix TDS 2024B (другий канал)

Детальні результати вимірювання при струмі 1 А наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювання напруги на виході СЗ при струмі 1 А

$f$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
$U_{C3}$ , мВ	73,2	80,4	83,5	85,4	88
$f$	0,08	0,09	0,1	0,2	0,3
$U_{C3}$ , мВ	89,5	88,2	89,3	91	91,5
$f$	0,4	0,5	1	2	3
$U_{C3}$ , мВ	92,1	91,5	91,5	91,6	91,5
$f$	4	5	6	7	10
$U_{C3}$ , мВ	91,5	91,5	91,5	91,5	91,5

Результати вимірювання показали, що:

– АЧХ експериментального зразка СЗ практично лінійна у діапазоні вимірювальних струмів від 1 мА до 5 А;

– при вимірювальних струмах вище 5 А починається насичення феритового кільця і напруга на виході СЗ падає;

– на частотах від 30 до 100 Гц напруга з виходу СЗ трохи зростає, а далі, аж до частоти 100 кГц, – вона практично незмінна

– розрахунки та експериментальні дослідження СЗ визначили, що можливо створити такий СЗ, який повністю відповідає вимогам виду вимірювань NCE01. Загальний вид такого СЗ, який отримав назву СЗ-А-НЧ (СР-А-LF), наведено на рис. 6. Для захисту СЗ від сторонніх заводо несучих електричних полів ВП розміщується у середині електростатичного екрану з прорізу по утворюючій лінії.

Конструктивні та метрологічні характеристики експериментального зразка СЗ-А-НЧ (СР-А-LF) наведено в табл. 2 [4].

Таблиця 2 – Основні характеристики СЗ-А-НЧ (СР-А-LF)

Найменування характеристики	Розмірність	Величина
1 Смуга робочих частот	кГц	0,03 - 100
2 Діапазон вимірюваних струмів радіозавод	дБ (відн. 1мкА)	10 - 134
3 Коефіцієнт калібрування	дБ	див. табл. 2 и рис. 2
4 Внутрішній діаметр СЗ	мм	80
5 Габаритні розміри ВП	мм	162x135x30
6 Маса	кг	0,5

Головною метрологічною характеристикою є коефіцієнт перетворення, який визначається за форму-

лою (6).

Згідно зі світовою практикою у галузі ЕМС, усі розрахунки ведуть в децибелах (дБ), які визначаються, наприклад, як

$$I_m (\text{дБ} \cdot \text{мкА}) = 20 \log I_m (\text{мкА}). \quad (8)$$

Тому

$$K_{II} (\text{дБ} \cdot \text{мкА/мкВ}) = I_m (\text{дБ} \cdot \text{мкА}) - U_{C3} (\text{дБ} \cdot \text{мкВ}). \quad (9)$$

У табл. 3 наведено залежність  $K_{II}$  (дБ·мкА/мкВ) від частоти згідно з результатами експериментальних досліджень.

На рис. 9 наведено графік коефіцієнта перетворення СЗ-А-НЧ (СР-А-LF) за табл. 3.

При вимірюванні емісії струмів радіозавод буде вимірюватися напруга з виходу СЗ. І тому не одразу видно перевищують чи ні ці напруги норми на струми радіозавод згідно з рис. 1. Щоб оператор зміг одразу це визначити, у табл. 4 наведено норми на напруги  $U_{C3}^m$ , які відповідають нормам на струми  $I_m$ , і розраховані за формулою (10):

$$U_{C3}^m (\text{дБ} \cdot \text{мкВ}) = I_m (\text{дБ} \cdot \text{мкА}) - K_{II} (\text{дБ} \cdot \text{мкА/мкВ}). \quad (10)$$

Таблиця 3 – Залежність коефіцієнта перетворення СЗ-А-НЧ (СР-А-LF) від частоти

Частота, Гц	Коефіцієнт перетворення $K_{II}(f)$ , дБ	Частота, Гц	Коефіцієнт перетворення, $K_{II}(f)$ , дБ
30	22,7	700	20,8
40	21,9	800	20,8
50	21,6	900	20,8
60	21,4	1000	20,8
70	21,1	2000	20,8
80	21,1	3000	20,8
90	21,1	4000	20,8
100	21,0	5000	20,8
200	20,8	11000	20,8
300	20,8	13000	20,8
400	20,8	14000	20,8
500	20,8	15000	20,8
600	20,8	100000	20,8

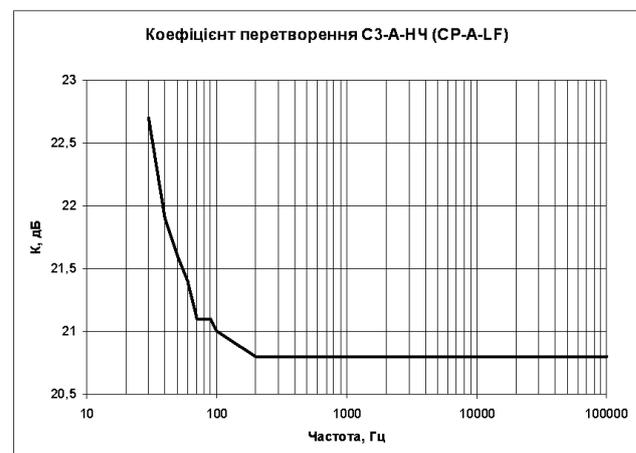


Рис. 9. Графік коефіцієнта перетворення СЗ-А-НЧ (СР-А-LF)

Таблиця 4 – Норми на струми та напруги  $U_{C3}^m$  за видом NCE01

Частота, кГц	Норми на струми, дБ·мкА		Норми на напруги, дБ·мкВ	
	крива 1	крива 2	крива 1	крива 2
0,03	110	100	87,3	77,3
0,04	110	100	88,1	78,1
0,05	110	100	88,4	78,4
0,06	110	100	88,6	78,6
0,07	110	100	88,9	78,9
0,08	110	100	88,9	78,9
0,09	110	100	88,9	78,9
0,1	110	100	89,0	79,0
0,2	110	100	89,2	79,2
0,3	110	100	89,2	79,2
0,4	110	100	89,2	79,2
0,5	110	100	89,2	79,2
0,6	110	100	89,2	79,2
0,7	110	100	89,2	79,2
0,8	110	100	89,2	79,2
0,9	110	100	89,2	79,2
1	110	100	89,2	79,2
2	104	94	83,2	73,2
3	100,5	90,5	79,7	69,7
4	98	88	77,2	67,2
5	96	86	75,2	65,2
6	94,5	84,5	73,7	63,7
7	93	83	72,2	62,2
8	92	82	71,2	61,2
9	91	81	70,2	60,2
10	90	80	69,2	59,2

Якщо на деяких частотах виміряні струми радіозавод перевищують норми, то для цього створюють табл. 5 (наведено зразок таблиці) згідно з формулою (11):

$$I(\text{дБ} \cdot \text{мкА}) = U(\text{дБ} \cdot \text{мкВ}) + K_{II}(\text{дБ} \cdot \text{мкА/мкВ}). \quad (11)$$

Таблиця 5 – Перевищення струмів радіозавод

Частота, кГц	Вимірний струм радіозавод, дБ мкА	Норма за табл. 4, дБ мкА	Перевищення, дБ мкА



Рис. 10. Робоче місце для вимірювання струмів радіозавод у дротах живлення виробу БПВР-400-1

Для перевірки роботоспроможності струмознімача СЗ-А-НЧ (СР-А-ЛФ) він був використаний при вимірюванні низькочастотних струмів радіозавод у

дротах живлення виробу БПВР-400-1Н [5]. На рис. 10 наведено робоче місце для вимірювання струмів радіозавод у дротах живлення виробу БПВР-400-1.

Результати вимірювання були позитивні, так як усі струми радіозавод не перевищували норм.

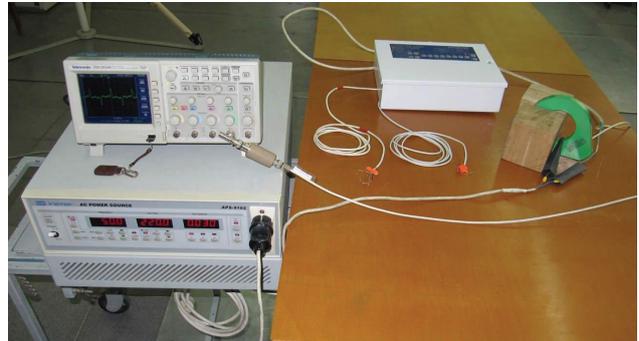


Рис. 11. Фотографія робочого місця при вимірюванні емісії гармонік струму у мережі живлення «Артон-08П»

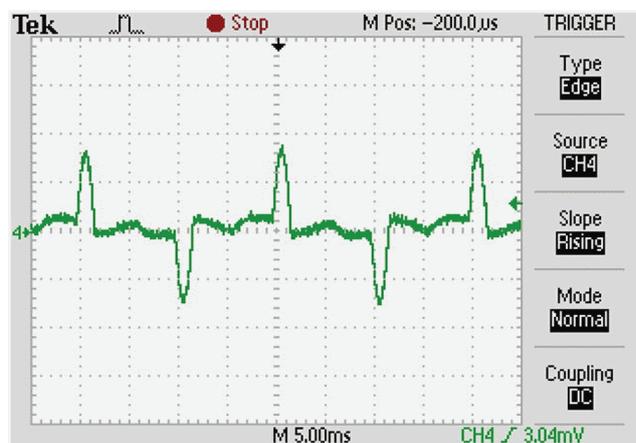


Рис. 12. Осцилограма струму у мережі живлення «Артон-08П»

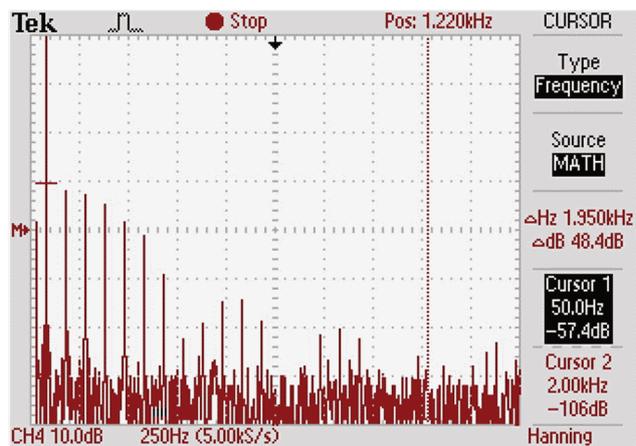


Рис. 13. Осцилограма гармонік струму у мережі живлення «Артон-08П» у режимі швидкого перетворення Фур'є

Крім того, СЗ-А-НЧ (СР-А-ЛФ) можливо використовувати і для інших цілей. Наприклад, для вимірювання емісії гармонік струму у мережі живлення приладів, що живляться від електромережі 220 В 50 Гц з робочим струмом до 5 А і які не повинні перевищува-

ти норми за п. 7.1 ДСТУ EN 61000-3-2:2004 [6].

Далі наведено, як цей метод застосовувався при вимірюванні гармонік струму від приладу «Артон-08П». Фотографія робочого місця наведена на рис. 11. Результати вимірювання робочого струму «Артон-08П» та його гармонік наведено на рис. 12, 13 та у табл. 6 [7].

Таблиця 6 – Результати вимірювання робочого струму «Артон-08П» та його гармонік

Порядок гармоніки, n (Гц)	Максимально допустима сила струму, мА	Виміряна від «Артон-08П» сила струму, мА	Результат випробувань
1 (50)	не встановлено	18	відповідає
2 (100)	1080	0,057	відповідає
3 (150)	2300	14,2	відповідає
4 (200)	430	0,112	відповідає
5 (250)	1140	12,6	відповідає
6 (300)	300	0,21	відповідає
7 (350)	770	10,2	відповідає
8 (400)	230	0,1	відповідає
9 (450)	400	6,7	відповідає
10 (500)	184	0,17	відповідає
12 (600)	153,3	0,14	відповідає
14 (700)	131,4	0,1	відповідає
16 (800)	115	0,089	відповідає
18 (900)	102,2	0,205	відповідає
20 (1000)	92	0,056	відповідає
22 (1100)	83,6	0,089	відповідає
24 (1200)	76,7	0,178	відповідає
26 (1300)	70,8	0,145	відповідає
28 (1400)	65,7	0,089	відповідає
30 (1500)	61,3	0,112	відповідає
32 (1600)	57,5	0,089	відповідає
34 (1700)	54,1	0,056	відповідає
36 (1800)	51,1	0,112	відповідає
38 (1900)	48,4	0,063	відповідає
40 (2000)	46	0,063	відповідає

. За використання сталої практики фахівців НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПИ», розроблено та створено макет вимірювального пристрою для реалізації випробувань за видом NCE01 стандарту НАТО АЕСТР-500. Дослідження метрологічних характеристик СЗ-А-НЧ підтвердило повну відповідність вимогам стандарту щодо діапазону частот від 30 Гц до 10 кГц, та сили струму від 60 до 130 дБ мкА.

Макет СЗ-А-НЧ пройшов апробацію при вимірюваннях струмів радіозавод за випробувань приладів БПВР-400-1Н та Артон-08П.

Створення макету СЗ-А-НЧ здійснено у рамках виконання науково-дослідної роботи «Розробка системи

випробувань типових видів озброєння та військової техніки України за стандартами НАТО з електромагнітної сумісності» (Реєстраційний номер 019U002571), яка фінансується Міністерством освіти і науки України.

1. АЕСТР 250 Electrical and electromagnetic environmental conditions.

2. АЕСТР 500 Electromagnetic environmental effects tests and verification. Edition E Version 1 December 2016.

3. MIL-STD-461 F Department of defence interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.

4. Токосъёмник типа ТС-А для диапазона рабочих частот от 1,5 кГц до 100 МГц. Паспорт. ТС-000.000.000 ПС.

5. Протокол испытаний блока выпрямления и распределения питания БВПР-МС-400-1Н на электромагнитную совместимость по ОСТ В1 02763-95, на эмиссию радиопомех по ОСТ В1 02696-90, на молниестойкость по ОСТ 1 01160-88, на устойчивость к электростатическому разряду по ДСТУ ІЕС 61000-4-2.

6. ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2008 Електромагнітна сумісність. Частина 3-2: норми. на емісію гармонік струму (Для сили вхідного струму обладнання не більше 16 А на фазу).

7. Підсумковий протокол №1-2016 міжлабораторних порівняльних випробувань приймально-контрольного пожежного приладу «АРТОН-08П» на несприйнятливості до впливу електростатичних розрядів, швидких перехідних процесів/пакетів імпульсів та сплесків напруги і струму, провалів та переривань напруги мережі, емісії гармонік струму та флуктуації напруги живлення. Пр МПВ EMC-CS-2-1:2016.

#### Bibliography (transliterated)

1. АЕСТР 250 Electrical and electromagnetic environmental conditions.

2. АЕСТР 500 Electromagnetic environmental effects tests and verification. Edition E Version 1 December 2016.

3. MIL-STD-461 F Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.

4. Tokos#emnik tipa TS-A dlja diapazona rabochih chastot ot 1,5 kGc do 100 MGc. Paspport. TS-000.000.000 PS.

5. Protokol ispytaniy bloka vyprjamlenija i raspredelenija pitaniya BVPR-MS-400-1N na jelektromagnitnuju sovmestimost' po OST V1 02763-95, na jemissiju radiopomeh po OST V1 02696-90, na molniestojkost' po OST 1 01160-88, na ustojchivost' k jelektrostatičeskomu razrjadu po DSTU ІЕС 61000-4-2.

6. DSTU ІЕС 61000-3-2:2008 Elektromagnitna sumisnist'. Chastina 3-2: normi. normi na emisiju garmonik strumu (Dlja sili vhidnogo strumu obladnannja ne bil'she 16 a na fazu).

7. Pidsumkovij protokol №1-2016 mizhlaboratornih porivnjal'nih viprobuvan' prijmal'no-kontrol'nogo pozhezhnogo priladu «ARTON-08P» na nesprijnjatlivist' do vplivu elektrostatičnih rozrjadiv, shvidkih perehidnih procesiv/paketiv impul'siv ta splskiv naprugi i strumu, provaliv ta pererivan' naprugi merezhi, emisii garmonik strumu ta fluktuacii naprugi zhivlennja. Pr MPV EMS-CS-2-1:2016.

Поспунула (received) 05.05.2019

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

(*Nemchenko Yur y Semenovych*) – Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник, головний метролог; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-68-68.

(*Lsnov van Petrovych*) – Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-68-68.

(*Sarayev Oleksandr vanovych*) – Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-68-68.

(*Guchenko Oleksandr Anatol jovych*) – Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-68-68.

УДК 621.314

. . . , . . .

В статье приведены результаты исследования зависимостей показателей изоляции от продолжительности эксплуатации для исправных и неисправных высоковольтных маслонаполненных вводов как герметичной, так и негерметичной конструкции. Для исследований использовались математические модели дисперсионного анализа линейной регрессии, модель парного регрессионного анализа и корреляционный анализ. По результатам исследований установлено, что в высоковольтных вводах с разным состоянием имеет место не только различие в численном значении показателей изоляции, что известно и широко используется, но и существенное различие в динамике изменения показателей во времени, что может быть использовано для диагностики состояния высоковольтных вводов.

: высоковольтные вводы, длительность эксплуатации, исправное состояние, неисправное состояние, динамика изменения показателей во времени, ковариационный анализ, регрессионный анализ, систематическая составляющая, случайная составляющая, корреляция.

. . . , . . .

У статті наведені результати дослідження залежностей показників ізоляції від тривалості експлуатації для справних і несправних високовольтних маслонаповнених ввідів як герметичної, так і негерметичної конструкції. За результатами досліджень встановлено, що в високовольтних вводах з різним станом має місце не тільки відмінність в чисельному значенні показників ізоляції, що відомо і широко використовується, але і велика різниця в динаміці зміни показників у часі, що може бути використано для діагностики стану високовольтних ввідів.

: високовольтні вводи, тривалість експлуатації, справний стан, несправний стан, динаміка зміни показників у часі, коваріаційний аналіз, регресійний аналіз, систематична складова, випадкова складова, кореляція.

**O. SHUTENKO, A. ZAGAYNOVA**

#### **DIAGNOSTICS OF THE STATE OF HIGH-VOLTAGE BUSHINGS BASED ON THE CHANGES DYNAMICS ANALYSIS IN THE INDICATORS OF INSULATION IN TIME**

The article presents the results of the study of the insulation dependence performance on the duration of operation for serviceable and faulty high-voltage oil-filled bushings of both sealed and leak-proof design. Mathematical models of variance analysis of linear regression, model of pair regression analysis and correlation analysis were used for research. According to the research results, it was found that in high-voltage bushings with different States there is not only a difference in the numerical value of the insulation indicators, which is known and widely used, but also a significant difference in the dynamics of the indicators in time. So for serviceable high-voltage bushings is characterized by the practical absence of a significant systematic component in the dependence of indicators on the duration of operation, the practical absence of a significant correlation between the indicators, as well as the presence of a significant correlation between the indicators of isolation bushings installed on adjacent phases. For faulty high-voltage bushings is characterized by the presence of a significant systematic component in the dependence of the indicators on the duration of operation, the presence of a significant correlation between the insulation indicators, as well as the lack of a significant correlation between the indicators of faulty bushing and indicators of serviceable bushings installed on adjacent phases. The revealed differences can be used for early diagnosis of the insulation state of high-voltage bushings.

**Keywords:** high-voltage bushing, operation duration, good condition, fault condition, dynamics of changes in indicators over time, covariance analysis, regression analysis, systematic component, random component, correlation.

. Бесперебойное снабжение потребителей электрической энергией, во многом определяется эксплуатационной надежностью электроэнергетического оборудования. Анализ эксплуатационной надежности высоковольтного оборудования показал, что высоковольтные вводы являются одним из наиболее повреждаемых узлов силовых трансформаторов [1–8]. При этом данная тенденция характерна не только для энергетической отрасли Украины [1–3], но и для большинства зарубежных стран [4–8]. Повреждение высоковольтных маслонаполненных вво-

дов являлись причиной многих аварий, как силовых трансформаторов, так и масляных выключателей и шунтирующих реакторов, что приводит к значительному экономическому ущербу [4, 5]. В связи с этим усовершенствование методов контроля состояния изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов, является актуальной и практически значимой задачей.

. В настоящее время оценка состояния изоляции высоковольтных вводов выполняется как по результатам пе-

© О.В. Шутенко, А.А. Загайнова, 2019

риодического, так и непрерывного контроля. При периодических испытаниях значения показателей изоляции вводов измеряются на низком напряжении (до 10 кВ), после чего полученные значения сравниваются с предельно допустимыми значениями, которые регламентированы в действующих стандартах, например в [9–11] или с результатами предыдущих испытаний. Очевидно, что периодические измерения на низком напряжении не всегда позволяют своевременно выявить повреждение изоляции. Особенно это касается быстроразвивающихся дефектов. В связи с этим вопросам усовершенствования методов контроля состояния изоляции, посвящено достаточно большое число публикаций. Например, в работе [12] приводятся результаты анализа влияния влаги и продуктов старения изоляции на значения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости основной изоляции вводов. В работе [13] анализируется возникновение частичных разрядов в изоляции вводов, в частности приведено распределение электрического поля по обкладкам вводов. В [14] установлено, что для раннего обнаружения увлажнения необходимо выполнять измерения показателей на частоте 1 МГц и 10 кГц. Отмечены преимущества использования высокочастотных методов измерения показателей по сравнению с измерениями на частоте 50 Гц. Обобщая приведенные результаты можно констатировать, что в основном усовершенствование методов контроля состояния изоляции высоковольтных вводов направлены на усовершенствование методов измерения значений показателей, в тоже время вопросы усовершенствования методов принятия решений при проведении периодического контроля практически не рассматриваются. Одним из возможных направлений усовершенствования процедуры принятия решения при оценке состояния изоляции высоковольтного оборудования является анализ динамики изменения показателей изоляции оборудования во времени. Например, в [15–16] для оценки степени окисления трансформаторных масел предложено использовать модели множественной регрессии. В [17] для оценки состояния изоляции использован метод траекторий. А в работах [18–19] предложен метод раннего обнаружения развивающихся дефектов в маслонаполненном оборудовании по результатам анализа растворенных в масле газов, который основан на анализе динамики изменения концентраций газов во времени. Однако, практическая реализация того или иного метода принципиально невозможна без анализа зависимостей показателей изоляции от длительности эксплуатации во вводах с разным состоянием, что и послужило причиной выполнения данных исследований.

Целью данной статьи является анализ зависимостей показателей изоляции от продолжительности эксплуатации для исправных и не исправных высоковольтных маслонаполненных вводов.

В качестве исходных данных анализировались результаты периодических

испытаний состояния изоляции по 68 исправным высоковольтным вводам герметичной конструкции и по 19 исправным высоковольтным вводам негерметичной конструкции. Для сравнения характера зависимостей показателей изоляции во вводах с разным состоянием также анализировались результаты периодического контроля для 9 высоковольтных вводов, которые были отбракованы по результатам периодических испытаний. Данные вводы были отбракованы из-за превышения предельно допустимых значений показателями изоляции, в основном тангенса угла диэлектрических потерь изоляции измерительного конденсатора ( $\text{tg}\delta_2$ ). Основными причинами превышения предельно допустимых значений являлись окисление и увлажнение трансформаторного масла, и старение изоляции.

В качестве показателей, характеризующих состояния изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов, анализировались значения:

- тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции ( $\text{tg}\delta_1$ );
- емкости основной изоляции ( $C_1$ );
- тангенса угла диэлектрических потерь изоляции измерительного конденсатора ( $\text{tg}\delta_2$ );
- емкости измерительного конденсатора ( $C_2$ );
- сопротивление изоляции вывода для измерения ( $R$ ).

Результаты периодических испытаний состояния изоляции высоковольтных вводов были представлены в виде временных рядов: значения показателя на длительность эксплуатации. На первом этапе исследований выполнялась оценка статистической однородности временных рядов показателей, для этого была использована математическая модель дисперсионного анализа линейных моделей (ковариационного анализа) [20]. Допустим, что временные ряды показателей описываются линейной регрессией, при этом характеристики регрессии меняются от группы к группе. Тогда соответствующая модель имеет вид:

$$Y_{ji} = \alpha_j + \beta_j \cdot t_{ji} + Z_{ji}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер измерения ( $i = \overline{1, n_j}$ ) для  $j$ -го показателя;  $t_{ji}$  – время  $i$ -го измерения значений  $j$ -го показателя;  $\alpha_j$ ,  $\beta_j$  – частные коэффициенты регрессии для значений  $j$ -й группы результатов измерения;  $z_{ji}$  – случайный неконтролируемый остаток, для которого  $M[Z_{ji}] = 0$  и  $M[Z_{ji}^2] = \sigma_z^2$ . Кроме этого, остатки  $z_{ji}$  взаимно независимы.

Если  $A_j$ ,  $B_j$  получены с помощью метода наименьших квадратов и являются оценками неизвестных коэффициентов  $a_j$  и  $b_j$ , то будет естественным рассмотреть может ли одно линейное уравнение

$$y = a + b \cdot x \quad (2)$$

представить все  $k$  регрессий (1).

Такая линейная  $2(k-1)$  гипотеза  $H_0$ : ( $a_1=a_2=\dots=a_k=a$ ;  $b_1=b_2=\dots=b_k=b$ ) соответствует выводу об одинаковой скорости дрейфа значений показателей

изоляции вводов на всем наблюдаемом интервале эксплуатации, что идентично полной однородности временных рядов показателей. Эту гипотезу удобно разбить на четыре части каждую, из которых можно проверить в отдельности.

$H_0^{(1)}$ : линии регрессии параллельны, т.е.  $(b_1=b_2=\dots=b_k)$ ;

$H_0^{(2)}$ : групповые средние лежат на прямой;

$H_0^{(3)}$ : угловой коэффициент этой прямой равен  $b_c$ , т.е. совпадает с  $(b_1, b_2, b_k)$ ;

$H_0^{(4)}$ : групповые свободные члены совпадают, т.е.  $(a_1=a_2=\dots=a_k)$ .

Для проверки данных гипотез найдем разложение полной суммы квадратов отклонений величин  $Y_{ij}$  от общего среднего. Такое разложение имеет вид [20]:

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ji} - \bar{y})^2 = w_0 \cdot B_0^2 + \frac{w_c \cdot w_m}{w_0} (B_c - B_m)^2 + \sum_{j=1}^k n_j [\bar{y}_j - \bar{y} - B_m \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})]^2 + \sum_{j=1}^k w_j \cdot (B_j - B_c)^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [y_{ji} - \bar{y}_j - B_j \cdot (x_{ji} - \bar{x}_j)]^2 \quad (3)$$

Результаты дисперсионного анализа для разложения (3) представлены в табл. 1.

Значение параметров  $a_m$  и  $b_m$  определяются уравнениями:

$$a_m = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^k n_j \cdot a_j;$$

$$b_m = \frac{1}{w_m} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x}) \cdot (a_j + b_j \cdot \bar{x}_j).$$

Учитывая результаты табл. 1, рассмотрим три дополнительные статистики:

$$S_{\Sigma 0} = S_{WG} + S_G + S_W; S_{\alpha} = S_G + S_{WG}; S_{R\alpha} = S_W + S_R.$$

Эти статистики связаны со следующими значениями степеней свободы:

$$v_{\Sigma 0} = v_{WG} + v_G + v_W; v_{\alpha} = v_{WG} + v_G; v_{R\alpha} = v_W + v_R.$$

Для проверки выдвинутых гипотез выполним расчет средних квадратов, которые определяются как:

$$\bar{S}_0 = \frac{S_0}{v_0}; \bar{S}_{WG} = \frac{S_{WG}}{v_{WG}}; \bar{S}_G = \frac{S_G}{v_G}; \bar{S}_W = \frac{S_W}{v_W};$$

$$\bar{S}_{\alpha} = \frac{S_{\alpha}}{v_{\alpha}}; \bar{S}_{R\alpha} = \frac{S_{R\alpha}}{v_{R\alpha}}; \bar{S}_R = \frac{S_R}{v_R}.$$

Полученные значения средних квадратов при известных значениях числа степеней свободы позволили рассчитать значения  $F$ -статистик:

$$F_0 = \frac{\bar{S}_0}{\bar{S}_R}; F_{WG} = \frac{\bar{S}_{WG}}{\bar{S}_R}; F_G = \frac{\bar{S}_G}{\bar{S}_R}; F_W = \frac{\bar{S}_W}{\bar{S}_R}; F_{\alpha} = \frac{\bar{S}_{\alpha}}{\bar{S}_{R\alpha}}.$$

Проверка гипотезы  $H_0^{(1)}$  осуществлялась путем сравнения значения статистики  $F_W$  с  $F$ -распределением

с  $k-1$  и  $N-2k$  степенями свободы. Гипотеза  $H_0^{(2)}$  проверялась путем сравнения статистики  $F_G$  с  $F$ -распределением с  $k-2$  и  $N-2k$  степенями свободы, а гипотеза  $H_0^{(3)}$  – путем сравнения статистики  $F_{WG}$  с  $F$ -распределением с 1 и  $N-2k$  степенями свободы. Проверка гипотезы выполнялась  $H_0^{(4)}$  путем сравнения статистики  $F_{\alpha}$  с  $F$ -распределением с  $k-1$  и  $N-k-1$  степенями свободы. Для оценки суммарных изменений в параметрах  $a_i$  и  $b_i$  модели используем тестовую статистику  $F_{\Sigma 0}$ :

$$F_{\Sigma 0} = \frac{\bar{S}_G + \bar{S}_{WG} + \bar{S}_W}{2 \cdot \bar{S}_R} \cdot \frac{N - 2 \cdot k}{k - 1}.$$

Таблица 1 – Результаты ковариационного анализа

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов отклонений
Общий угловой коэффициент регрессии	$v_0 = 1$	$S_0 = \omega_0 B_0^2$
Угловой коэффициент групповых средних по сравнению со средневзвешен. коэффициентом	$v_{WG} = 1$	$S_{WG} = \frac{\omega_c \cdot \omega_m}{\omega_0} \cdot (B_c - B_m)^2$
Относительно линейной регрессии групповых средних	$v_G = k - 2$	$S_G = \sum_{i=1}^k n_j \cdot [\bar{y}_j - \bar{y} - B_m \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})]^2$
Между угловыми коэффициентами внутри групп	$v_W = k - 1$	$S_W = \sum_{j=1}^k \omega_j (B_j - B_c)^2$
Остаток	$v_R = N - 2k$	$S_R = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [y_{ji} - \bar{y}_j - B_j (x_{ji} - \bar{x}_j)]^2$
Общий	$v = N - 1$	$S = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ji} - \bar{y})^2$

Систематическое изменение математического ожидания любого из показателей контроля под влиянием времени эксплуатации  $Y$  можно оценить с помощью тестовой статистики  $F_0$ . Полное дисперсионное разложение выполнялось с помощью программы «KOVAN», разработанной на кафедре «Передача электрической энергии» НТУ «ХПИ» [21]. Результаты анализа для исправных высоковольтных вводов герметичного исполнения приведены в табл. 2, для исправных высоковольтных вводов негерметичного исполнения в табл. 3, а для герметичных вводов, в которых были выявлены неисправности в табл. 4.

В данных таблицах приведены значения сумм дисперсионного разложения, числа степеней свободы и значения критериев  $F_0, F_{\alpha}, F_w, F_{S0}$ , а также критериев  $F_{WG}$  и  $F_G$ , которые можно использовать для оценки равномерности рассеяния аддитивных отклонений относительно среднего значения свободного члена линейной регрессии:  $M[\alpha_t] = \bar{Y} - B_0 \cdot \bar{T}$ .

Таблица 2 – Результаты дисперсионного разложения для показателей изоляции исправных высоковольтных вводов герметичной конструкции напряжением 110 кВ

Результаты разложения	Показатель				
	$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	$R$
Объем выборки	453	453	453	453	453
Число рядов	68	68	68	68	68
Значения сумм дисперсионного разложения					
$S$	47,505	82,426	8273962,304	12690061,229	1829253642,384
$S_0$	0,369	3,545	1991403,916	1102157,096	427283328,995
$S_{WG}$	0,222	2,812	1065379,407	477434,953	8736739,378
$S_G$	21,577	29,336	306977,5348	7184996,707	764782740,280
$S_w$	7,565	11,505	910831,2308	1890796,332	205838816,950
$S_R$	17,772	35,228	2999370,216	2034676,141	412612016,781
$S_\alpha$	21,799	32,148	2372356,942	7662431,660	783519479,658
$S_{R\alpha}$	25,338	46,733	3910201,447	3925472,473	618450833,731
$S_{\Sigma 0}$	29,364	43,653	3283188,173	9553227,992	989358296,608
Число степеней свободы					
$\nu_0$	1	1	1	1	1
$\nu_{WG}$	1	1	1	1	1
$\nu_G$	66	66	66	66	66
$\nu_w$	67	67	67	67	67
$\nu_R$	317	317	317	317	317
$\nu_\alpha$	67	67	67	67	67
$\nu_{R\alpha}$	384	384	384	384	384
Значения $F$ -критерия (наблюдаемое /табличное при $p=0,95$ )					
$F_0$	6,580/3,841	31,897/3,841	210,469/3,841	171,714/3,841	328,271/3,841
$F_{WG}$	3,961/3,841	25,306/3,841	112,598/3,841	74,383/3,841	14,394/3,841
$F_G$	5,831/1,308	3,999/1,308	2,092/1,308	16,960/1,308	8,902/1,308
$F_w$	2,013/1,306	1,306/1,306	1,436/1,306	4,396/1,306	2,360/1,306
$F_\alpha$	4,930/1,306	3,942/1,306	3,477/1,306	11,187/1,306	7,261/1,306
$F_{\Sigma 0}$	3,908/1,373	2,931/1,373	2,589/1,373	11,107/1,373	5,672/1,373

Сравнивая результаты из табл. 2–4, легко увидеть, что характер зависимостей показателей от длительности эксплуатации для высоковольтных вводов с разным состоянием существенно отличается. Как видно из табл. 2–3 для показателей исправных высоковольтных вводов, как герметичной, так и негерметичной конструкции расчетные значения критериев  $F_w$  превышают критические значения  $F$ -критерия с учетом числа степеней свободы, а, следовательно, гипотеза  $H_0^{(1)}$  отвергается. Исключение составляют показатели  $\text{tg}\delta_2$  и  $R$  для вводов негерметичной конструкции (см. табл. 3). Для большинства показателей линии регрессии не параллельны, что свидетельствует о том, что старение изоляции во вводах протекает с разной скоростью, т.е. имеет место наличие мультипликативного смещения между отдельными временными рядами показателей, которое обусловлено различными значениями токов нагрузки, продолжительностью эксплуатации и других факторов [22]. В тоже время, практически для всех показателей исправных высоковольтных вводов, за исключением емкости основной изоляции  $C_1$  (см. табл. 4), гипотеза  $H_0^{(1)}$  не отвергается.

Для всех показателей исправных высоковольтных вводов герметичной конструкции расчетные значения критерия  $F_G$ , превышают критические значения  $F$ -критерия с  $k-2$  и  $N-2k$  степенями свободы. Т.е. для показателей исправных высоковольтных вводов герметичной конструкции, гипотеза о том, что групповые средние лежат на прямой  $H_0^{(2)}$  была отвергнута. Для исправных негерметичных вводов (см. табл. 3) гипотеза о том, что групповые средние лежат на прямой

$H_0^{(2)}$  была отвергнута для всех показателей за исключением емкости  $C_1$ . В тоже время для отбракованных вводов (см. табл. 4), для всех показателей, кроме емкости  $C_1$ , гипотеза  $H_0^{(2)}$  не отвергается. Данное обстоятельство может быть объяснено ограниченным объемом анализируемой выборки для неисправных вводов. Для исправных высоковольтных вводов герметичной конструкции, гипотеза  $H_0^{(3)}$  о том, что угловой коэффициент линейной регрессии построенной по всей совокупности исходных данных равен частным угловым коэффициентам отдельных временных рядов показателей отвергается, поскольку расчетные значения критерия  $F_{WG}$  превышают критические значения  $F$  – критерия, при числе степеней свободы 1 и  $N-2k$ . Это свидетельствует о том, что процессы старения а, следовательно, и интенсивность изменения показателей изоляции исправных вводов, протекают с разной скоростью.

Для исправных вводов негерметичной конструкции (см. табл. 3) гипотеза  $H_0^{(3)}$  также была отвергнута для всех показателей изоляции, кроме емкости  $C_1$ . Для неисправных вводов (см. табл. 4), гипотеза  $H_0^{(3)}$  не отвергается только для временных рядов  $\text{tg}\delta_2$  изоляции измерительного конденсатора. Для временных рядов остальных показателей гипотеза  $H_0^{(3)}$  была отвергнута. Последний вывод является принципиально важным, поскольку он показывает, что в зависимости от характера повреждения, значения показателей изоляции вводов, могут изменяться разным образом. Гипотеза  $H_0^{(4)}$  о том, что групповые свободные члены

совпадают, была отвергнута для всех показателей исправных вводов герметичной конструкции (см. табл. 2). Из табл. 2 следует, что для всех без исключения показателей критерии  $F_w$  и  $F_\alpha$  связаны неравенством  $F_w < F_\alpha$ , что указывает, на систематические расхождения в исходных значениях показателей, полученных перед началом эксплуатации вводов. Кроме того, большие значения критерия  $F_G$  говорят о неравномерности разброса начальных значений показателей, что свидетельствует о существенных расхождениях в значениях показателей изоляции вводов в зависимости от завода-изготовителя. Такая же тенденция имеет место и для исправных негерметичных вводов, кроме емкости  $C_1$ . Для вводов с повреждениями (см. табл. 4) наиболее существенные различия в исходных значениях показателей выявлены для показателей  $C_1$ ,  $C_2$  и  $R$ . Для временных рядов данных показателей гипотеза  $H_0^{(4)}$  была отвергнута. А вот для временных рядов  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$  оснований для того, чтобы гипотеза  $H_0^{(4)}$  была отвергнута, не выявлено. Выполненный анализ значений критерия  $F_{\Sigma 0}$  выявил значимое влия-

ние суммарных изменений в параметрах  $a_i$  и  $b_i$  модели для всех без исключения показателей изоляции исправных вводов герметичного исполнения и для всех показателей, кроме  $C_1$  для исправных вводов негерметичного исполнения. В тоже время для неисправных вводов, такое влияние имеет место только для показателей, для которых свободные члены не совпадают ( $C_1$ ,  $C_2$  и  $R$ ), что вполне очевидно и не противоречит полученным ранее результатам. Что же касается систематических изменений математического ожидания показателей, то как видно из табл. 2, значения критерия  $F_0$ , для исправных вводов герметичного исполнения, превышают критические значения, что свидетельствует о значимом изменении средних значений показателей со временем эксплуатации, т.е. о наличии процессов старения изоляции вводов. Для исправных вводов негерметичного исполнения (см. табл. 3) значимое изменение средних значений выявлено для всех показателей кроме  $C_1$  и  $R$ , для неисправных вводов (см. табл. 4) также для всех показателей.

Таблица 3 – Результаты дисперсионного разложения для показателей изоляции исправных высоковольтных вводов негерметичной конструкции напряжением 110 кВ

Результаты разложения	Показатель				
	$\text{tg}\delta_1$	$\text{tg}\delta_2$	$C_1$	$C_2$	$R$
Объем выборки	140	140	140	140	140
Число рядов	19	19	19	19	19
Значения сумм дисперсионного разложения					
$S$	74,885	44,541	6791737,727	7135444,921	954601714,286
$S_0$	0,596	1,709	3098,457	296823,287	5509330,092
$S_{WG}$	12,259	3,679	116987,796	138682,558	44335403,011
$S_G$	45,736	21,964	972274,463	3942059,551	564354160,642
$S_w$	4,043	2,390	1556803,169	966865,633	39202941,026
$S_R$	12,251	14,798	4142573,842	1791013,892	301199879,514
$S_\alpha$	57,996	25,643	1089262,259	4080742,109	608689563,653
$S_{R\alpha}$	16,294	17,189	5699377,011	2757879,525	340402820,540
$S_{\Sigma 0}$	62,038	28,034	2646065,428	5047607,742	647892504,679
Число степеней свободы					
$\nu_0$	1	1	1	1	1
$\nu_{WG}$	1	1	1	1	1
$\nu_G$	17	17	17	17	17
$\nu_w$	18	18	18	18	18
$\nu_R$	102	102	102	102	102
$\nu_\alpha$	18	18	18	18	18
$\nu_{R\alpha}$	120	120	120	120	120
Значения $F$ -критерия (наблюдаемое/табличное при $p=0,95$ )					
$F_0$	4,958/3,944	11,776/3,944	0,0762/3,944	16,904/3,944	1,865/3,944
$F_{WG}$	102,1/3,944	25,358/3,944	2,880/3,944	7,898/3,944	15,01/3,944
$F_G$	22,399/1,74	8,905/1,74	1,408/1,74	13,206/1,74	11,242/1,74
$F_w$	1,869/1,721	0,915/1,721	2,129/1,721	3,059/1,721	0,737/1,721
$F_\alpha$	23,72/1,695	9,945/1,695	1,274/1,695	9,864/1,695	11,92/1,695
$F_{\Sigma 0}$	14,34/1,982	5,367/1,982	1,809/1,982	7,985/1,982	6,094/1,982

Более точную информацию о характере зависимостей показателей изоляции от продолжительности эксплуатации для высоковольтных вводов с разным состоянием, можно получить, проанализировав зависимости для отдельных вводов. Для этого математическая модель состояния объекта контроля может быть представлена в виде многомерного вектора показателей (характеристик) [23]:

$$\bar{x}(t) = \bar{G}(t) + \bar{\eta}(t) + \bar{\xi}(t), \quad (4)$$

где  $\bar{G}(t)$  – постоянная составляющая, характеризующая в объекте необратимые изменения;  $\bar{\eta}(t)$  – обратимые изменения;  $\bar{\xi}(t)$  – погрешность измерительных средств контроля.

Таблица 4 – Результаты дисперсионного разложения для показателей изоляции неисправных высоковольтных вводов, напряжением 110 кВ

Результаты разложения	Показатель				
	tgδ <sub>1</sub>	tgδ <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	R
Объем выборки	60	60	60	60	60
Число рядов	9	9	9	9	9
Значения сумм дисперсионного разложения					
S	2,057	21,961	825092,290	1105263,170	692036093,333
S <sub>0</sub>	0,158	2,857	155702,341	58195,516	172862580,239
S <sub>WG</sub>	0,144	0,003	215021,228	402902,058	278678246,546
S <sub>G</sub>	0,383	2,791	446158,808	352560,342	44408676,903
S <sub>w</sub>	0,275	4,448	3605,246	32136,763	13032577,067
S <sub>R</sub>	1,096	11,863	4604,667	259468,489	183054012,578
S <sub>α</sub>	0,528	2,794	661180,036	755462,401	323086923,449
S <sub>Rα</sub>	1,372	16,311	8209,913	291605,253	196086589,645
S <sub>Σ0</sub>	0,803	7,241	64785,282	787599,164	336119500,517
Число степеней свободы					
v <sub>0</sub>	1	1	1	1	1
v <sub>WG</sub>	1	1	1	1	1
v <sub>G</sub>	7	7	7	7	7
v <sub>w</sub>	8	8	8	8	8
v <sub>R</sub>	42	42	42	42	42
v <sub>α</sub>	8	8	8	8	8
v <sub>Rα</sub>	50	50	50	50	50
Значения F-критерия (наблюдаемое /табличное при p=0,95)					
F <sub>0</sub>	6,036/4,076	10,114/4,076	1420,189/4,076	9,420/4,076	39,661/4,076
F <sub>WG</sub>	5,532/4,076	0,0106/4,076	1961,247/4,076	65,217/4,076	63,94/4,076
F <sub>G</sub>	2,097/2,24	1,411/2,24	581,356/2,24	8,152/2,24	1,455/2,24
F <sub>w</sub>	1,319/2,171	1,968/2,171	4,110/2,171	0,650/2,171	0,373/2,171
F <sub>α</sub>	2,403/2,138	1,070/2,138	503,339/2,138	16,191/2,138	10,297/2,138
F <sub>Σ0</sub>	1,922/3,039	1,602/3,039	378,976/3,039	7,968/3,039	4,819/3,039

Считается, что регулярная составляющая представляет собой гладкую функцию от аргумента времени  $t$ , описываемую конечным вектором параметров  $\beta$ .  $\bar{G}(t) = f(\bar{\beta}, t)$ . Используя терминологию статистического анализа временных рядов [23], регулярную составляющую назовем трендом. Случайная составляющая  $\bar{\eta}(t)$  – это случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и с достаточно узкой автокорреляционной функцией. Составляющие  $\bar{\eta}(t)$  и  $\xi(t)$  определяют стохастическую часть процесса. Для простоты анализа составляющие  $\bar{\eta}(t)$  и  $\xi(t)$  можно объединить в процесс (4) и записать в виде:

$$\bar{x}(t) = \bar{G}(t) + \bar{\eta}(t). \tag{5}$$

Процессом постепенного изменения технического состояния объекта контроля будем считать процесс, для которого выполняется соотношение:

$$\|G(t+t) - G(t)\| \gg \|\eta(t+t) - \eta(t)\|, \tag{6}$$

где ... – норма вектора.

Действительно, чем сильнее неравенство (6), тем ближе процесс к детерминированному, функционально зависящему от времени эксплуатации  $t$ . При этом случайный процесс предполагается стационарным по среднему значению, т.е.:

$$M[\eta(t)] = 0. \tag{7}$$

Если выполняется условие (7) для процесса (5), то он может считаться детерминированным и его можно использовать для прогнозирования технического состояния объекта (например, для оценки остаточного ресурса или параметрического отказа). В таком случае многомерный процесс необратимого изменения технического состояния объекта контроля определяется вектором  $W[\beta(x), t]$  функции времени, постоянных коэффициентов  $\beta$ :

$$\bar{x}(t) = \bar{W}[\bar{\beta}(x), t] + \bar{E}, \tag{8}$$

где  $\bar{E}$  – вектор случайных ошибок, не зависящих от времени эксплуатации.

При больших значениях дисперсий случайных ошибок можно использовать операции сглаживания, практически сводящиеся к минимизации суммы квадратов отклонений (метод наименьших квадратов):

$$\sum_{i=1}^n \{x_j(t_i) - \bar{W}[\bar{\beta}(x), t_i]\}^2 = \min, \tag{9}$$

где  $x(t_i)$  – одномерный временной ряд для  $j$ -й составляющей вектора  $X(t)$ .

Выражение (8) позволяет рассматривать изменения в ходе периодических испытаний значения показателей  $X_i$  как реализации нестационарных по среднему и непрерывных случайных процессов с дискретным временем (временем профилактических испытаний). Под значимостью контролируемого показателя качества будем понимать его способность ощу-

тимо изменять регулярную составляющую  $W[\beta(x), t]$  на фоне случайной величины  $e_i$ , что предполагает превышение изменения тренда  $f(\beta, t)$  над средним квадратическим отклонением процесса  $\sigma^2$  в интервале времени эксплуатации оборудования.

Определение вида функций  $\overline{W}[\beta(x), t_i]$  и оценка коэффициентов  $\beta_k(x)$ ,  $k = \overline{1, P}$ , должна производиться по априорно известной обучающей выборке, т.е. фактически по результатам подконтрольной эксплуатации объекта (по результатам профилактических испытаний). При этом для снижения ошибок первого и второго рода имеет смысл уменьшить дисперсию случайной величины  $e_i$  путем исключения из массива исходных данных заведомо искаженных выборочных последовательностей. Превышение случайной величины  $e_i$  над регулярной составляющей  $W[\beta(x), t]$  может привести к тому, что на анализируемом промежутке времени процесс окажется стационарным по математическому ожиданию, либо при наличии наиболее грубых ошибок изменит направление.

Для проверки условия (7) использовался параметрический тест на значимость линейной регрессии показателя качества по времени эксплуатации. Такой тест эквивалентен однофакторного дисперсному анализу показателя качества на наличие систематического смещения среднего значения на различных интервалах времени эксплуатации [24, 25]. Тестирование временных рядов как непрерывных случайных процессов с дискретным временем проводилось при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и основной гипотезе  $H_0$  – числовые характеристики ряда инвариантны во времени. Проверка основной гипотезы  $H_0$  для всех временных рядов показателей проводилась в следующей последовательности.

Рассматривалась статистическая модель:

$$Y_i = b_0 + b_1 \cdot x_i + \varepsilon_i \quad (10)$$

Остатки распределены по нормальному закону:  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$  с  $M[\varepsilon_i] = 0$ ;  $D[\varepsilon_i] = \sigma^2$ ;  $cov[\varepsilon_i] = 0, i = 1, n$ .

Коэффициенты линейной регрессии определялись с помощью метода наименьших квадратов:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - \sum_{i=1}^n Y_i \cdot t_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - \sum_{i=1}^n t_i^2}; \quad (11)$$

$$b_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n Y_i \cdot t_i - \sum_{i=1}^n Y_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - \sum_{i=1}^n t_i^2}, \quad (12)$$

где:  $Y_i$  – текущее значение показателя;  $t_i$  – текущее значение времени эксплуатации;  $n$  – объем выборочных значений.

После чего рассчитывалось значение величины  $R^2$ , которая представляет собой отношение полезного сигнала (сумма квадратов отклонений, обусловленная

регрессией, т.е. фактически угловым коэффициентом  $b_1$ ) к шуму (сумма квадратов отклонений относительно регрессии), по выражению:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2},$$

где:  $\hat{Y}_i$  – текущее значение показателя, рассчитанное по (10) с учетом значений коэффициентов  $b_1$  и  $b_0$ ;  $\bar{Y}$  – математическое ожидание показателя.

Вычислялась критериальная статистика  $F_{1, (n_i-2)}$ , как функция оценки  $R^2$ :

$$F_{1, (n_i-2)} = \frac{R^2}{(1 - R^2)} (n_i - 2). \quad (13)$$

3. Рассчитанное значение критерия Фишера сравнивалось с 95% точкой  $F$ –распределения с 1 и  $(n_i-2)$  степенями свободы.

4. Решение: основная гипотеза  $H_0$  ( $b_1=0$ ) отвергалась, если  $F_{1, (n_i-2)} > F_{кр}$

Полное дисперсионное разложение выполнялось с помощью программы «REGAN», [21]. Результаты регрессионного анализа для показателей изоляции исправных вводов герметичного исполнения приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты регрессионного анализа для показателей изоляции исправных высоковольтных вводов герметичной конструкции, напряжением 110 кВ

Показатель	N	n	Стационарные временные ряды ( $F_{рас} < F_{кр}$ )				Не стационарные временные ряды ( $F_{рас} > F_{кр}$ )					
			$b_1 < 0$		$b_1 > 0$		$b_1 < 0$		$b_1 > 0$			
			N	n	N	n	N	n	N	n		
tgδ <sub>1</sub>	453	68	204	28	223	36	5	1	0	0	21	3
tgδ <sub>2</sub>	453	68	200	34	229	31	0	0	24	3	0	0
C <sub>1</sub>	453	68	171	33	157	25	0	0	73	7	52	3
C <sub>2</sub>	453	68	136	22	184	32	0	0	54	7	79	7
R	453	68	25	4	29	5	285	51	114	8	0	0

$N$  – количество измерений;  $n$  – количество временных рядов.

Как видно из табл. 5, в исправных высоковольтных вводах герметичной конструкции случайная составляющая превышает систематическую составляющую практически для всех показателей. Из 68 анализируемых рядов значение  $F$ –критерия превышает критические значения только для 3-х рядов tgδ<sub>1</sub> и tgδ<sub>2</sub> (при этом для tgδ<sub>2</sub> значения показателя значимо снижаются с ростом продолжительности эксплуатации), 10 рядов для C<sub>1</sub> (для 7 рядов значение C<sub>1</sub> снижается с ростом продолжительности эксплуатации) и 14 рядов C<sub>2</sub> (для 7 рядов значение C<sub>2</sub> снижается с ростом продолжительности эксплуатации). Из 68 рядов значимое снижение сопротивления измерительного вывода выявлено только для 8 вводов. Для всех остальных временных рядов показателей значение  $F$ –критерия не превышает критические значения. Более того, как

видно из табл. 5, почти для 50% всех стационарных зависимостей, значения показателей незначительно уменьшаются с течением времени. В 51 вводе из 68 вводов значение сопротивления изоляции R вообще не изменялось с течением времени ( $b_1=0$ ). Обобщая полученные результаты можно сделать вывод, что для показателей состояния исправных вводов герметичного исполнения, случайная, стохастическая составляющая процесса, значимо превышает систематическую составляющую.

Результаты регрессионного анализа для показателей изоляции исправных высоковольтных вводов негерметичной конструкции приведены в табл. 6. Как видно из табл.6, из 19 анализируемых вводов значимый рост значений  $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$  выявлен только в трех вводах. Для всех остальных вводов зависимости  $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$  от длительности эксплуатации являются стационарными, при этом наблюдается незначимое снижение значений  $tg\delta_1$  в 9 высоковольтных вводах, а  $tg\delta_2$  в 6 вводах. Из 19 исправных негерметичных вводов значимого изменения значений емкости основной изоляции и сопротивления измерительного вывода не выявлено ни в одном, что подтверждает результаты ковариационного анализа. При этом в 11 из 19 вводов значения R вообще не менялись на всем интервале наблюдений. Значимые изменения значений емкости  $C_2$  выявлены в 7 вводах из 19, при этом в 4 вводах значения  $C_2$  значимо снижаются с ростом длительности эксплуатации, а в 3 вводах значимо растут.

Результаты регрессионного анализа полученные для отбракованных высоковольтных вводов, приведены в табл. 7.

Таблица 6 – Результаты регрессионного анализа для показателей изоляции исправных высоковольтных вводов негерметичной конструкции напряжением 110 кВ

Показатель	N	n	Стационарные временные ряды ( $F_{рас} < F_{кр}$ )						Нестационарные временные ряды ( $F_{рас} > F_{кр}$ )			
			$b_1 < 0$		$b_1 > 0$		$b_1 = 0$		$b_1 < 0$		$b_1 > 0$	
			N	n	N	n	N	n	N	n	N	n
$tg\delta_1$	140	19	49	8	49	7	0	0	6	1	36	3
$tg\delta_2$	140	19	35	5	75	11	0	0	0	0	30	3
$C_1$	140	19	51	7	89	12	0	0	0	0	0	0
$C_2$	140	19	39	6	38	6	0	0	35	4	28	3
R	140	19	52	6	22	2	56	11	0	0	0	0

N – количество измерений; n – количество временных рядов.

Таблица 7 – Результаты регрессионного анализа для показателей изоляции отбракованных высоковольтных вводов, напряжением 110 кВ

Показатель	N	n	Стационарные временные ряды ( $F_{рас} < F_{кр}$ )						Не стационарные ряды ( $F_{рас} > F_{кр}$ )			
			$b_1 < 0$		$b_1 > 0$		$b_1 = 0$		$b_1 < 0$		$b_1 > 0$	
			N	n	N	n	N	n	N	n	N	n
$tg\delta_1$	60	9	23	3	9	1	0	0	0	0	28	5
$tg\delta_2$	60	9	0	0	9	1	0	0	0	0	51	8
$C_1$	60	9	22	3	14	2	0	0	14	2	10	2
$C_2$	60	9	0	0	12	2	0	0	48	7	0	0
R	60	9	22	3	5	1	15	3	9	1	9	1

N – количество измерений; n – количество временных рядов.

Как видно из табл. 7, развитие дефекта в изоляции высоковольтных вводов приводит к появлению во временных зависимостях показателей значимой систематической составляющей.

При этом в отличие от исправных вводов, в каждом дефектном вводе выявлена значимая систематическая составляющая как минимум для одного показателя. Таким образом, еще одним признаком наличия дефекта изоляции высоковольтных вводов является появление значимой систематической составляющей в зависимостях показателей от продолжительности эксплуатации.

Сравнивая между собой результаты ковариационного и регрессионного анализа для исправных трансформаторов как герметичной, так и негерметичной конструкции легко увидеть, что для объединенного массива данных изменение большинства показателей во времени являются значимыми. В тоже время общее число отдельных временных рядов показателей, для которых выявлено значимое изменение во времени, крайне мало. Таким образом, наличие даже относительно небольшого количества временных рядов показателей, которые значимо изменяются во времени, в объединенном массиве данных, приводит к тому, что зависимость показателей от длительности эксплуатации в объединенном массиве приобретает нестационарный характер. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены зависимости емкости  $C_2$  от длительности эксплуатации для объединенного массива данных (рис. 1 а) и для показателей, для которых выявлены значимые зависимости от продолжительности эксплуатации (рис. 1, б). Сравнивая зависимости, приведенные на рис. 1, а и рис. 1, б, легко увидеть, что временные ряды, для которых выявлено значимое изменение во времени, имеют большее количество измерений и получены для более продолжительных интервалов эксплуатации, по сравнению с остальными результатами. Как видно из табл. 7, развитие дефекта в изоляции высоковольтных вводов приводит к появлению во временных зависимостях показателей значимой систематической составляющей. При этом в отличие от исправных вводов в каждом неисправном вводе выявлена значимая систематическая составляющая как минимум для одного показателя. Для подтверждения данного вывода рассмотрим динамику изменения показателей изоляции в высоковольтных вводах с разным состоянием. Поскольку для линейных моделей значение меры согласия  $R^2$  равно квадрату коэффициента парной корреляции [26], то для оценки динамики изменения показателей использовалось значение коэффициента парной корреляции:

$$r_B = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p}) \cdot (t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}}, \quad (14)$$

где  $r_B$  – выборочное значение коэффициента парной корреляции;  $p_i$  – текущее значение показателя;  $t_i$  – текущее значение времени эксплуатации;  $\bar{p}$  – среднее

значение показателя;  $\bar{t}$  – среднее значение времени эксплуатации;  $n$  – объем выборочных значений.

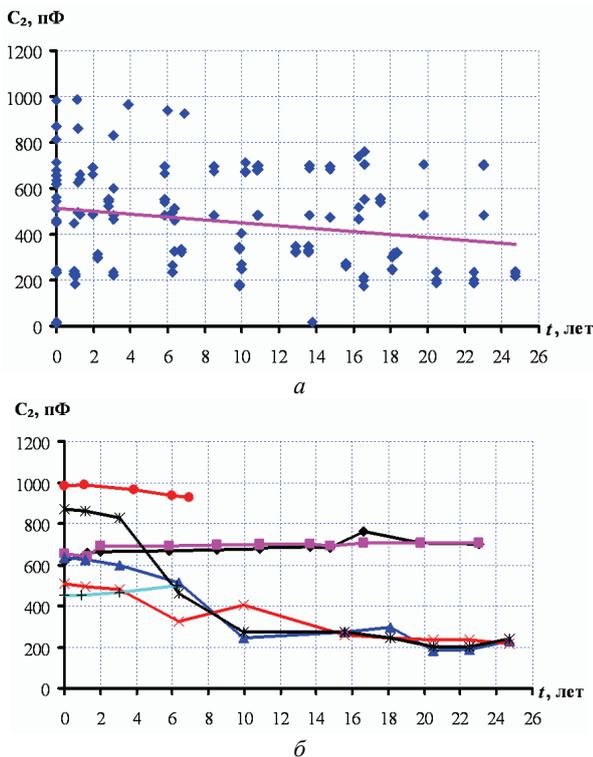


Рис. 1. Зависимости емкости наружных слоев изоляции ( $C_2$ ) от длительности эксплуатации для объединенного массива данных (а) и для показателей, для которых выявлены значимые зависимости от продолжительности эксплуатации (б)

Решение о наличии значимой корреляционной связи принималось, если расчетное выборочное значение коэффициента парной корреляции ( $r_b$ ) превышало критическое значение ( $r_{крит.}$ ) при числе степеней свободы  $n-2$  и доверительной вероятности  $p=0,95$  (для удобства анализа такие значения выделены жирным шрифтом). Такой подход позволяет не только оценить наличие связи между показателями и продолжительностью эксплуатации, но и оценить связь между отдельными показателями, а также между показателями во вводах на соседних фазах [18, 19].

Таблица 8 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции и длительностью эксплуатации и между отдельными показателями ввода ГМТА–110/630–У1 110 кВ

Показатель	Корреляция между показателями и длительностью эксплуатации	$tg\delta_1$	$tg\delta_2$	$C_1$	$C_2$	R
$n=9, r_{крит. 7, 0,95}=0,666$						
$tg\delta_1$	<b>0.693</b>	<b>1,00</b>	<b>0.875</b>	-0.456	-0.323	-0.396
$tg\delta_2$	<b>0.865</b>	<b>0.875</b>	<b>1,00</b>	-0.397	-0.294	-0.561
$C_1$	-0.601	-0.456	-0.397	<b>1,00</b>	<b>0.936</b>	0.085
$C_2$	-0,534	-0.323	-0.294	<b>0.936</b>	<b>1,00</b>	-0.057
R	-0,302	-0.396	-0.561	0.085	-0.057	<b>1,00</b>

Примечание:  $n$  – количество измерений

В табл. 8 приведены результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции и длительностью эксплуатации, а также между отдельными показателями ввода ГМТА–110/630–У1 110 кВ, установленного на фазе А трансформатора ТРДН–25/110. Данный ввод был отбракован по значениям  $tg\delta_2$  и 07.07.2017 года был выведен из эксплуатации. Как видно из табл.8, из пяти показателей значимая положительная связь с продолжительностью эксплуатации (наличие значимой систематической составляющей) выявлено только для  $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$ . Значимая корреляционная связь имеет место только между  $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$  и между емкостью  $C_1$  и емкостью  $C_2$ .

В табл. 9, приведены результаты корреляционного анализа между показателями изоляции неисправного ввода (фаза А) и исправных вводов установленных на фазах В и С. Предполагалось, что характер изменения показателей изоляции во времени, для неисправного высоковольтного ввода, должен существенно отличаться от характера изменения во времени показателей в исправных высоковольтных вводах. Т.е. значимая корреляционная связь между показателями изоляции для неисправного и исправных вводов должна отсутствовать.

Таблица 9 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей неисправного ввода ГМТА–110/630–У1 110 кВ (фаза А) и показателями исправных вводов, установленных на соседних фазах (В и С)

Фаза	$tg\delta_1/tg\delta_1$	$tg\delta_2/tg\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n=9, r_{крит. 7, 0,95}=0,666$					
А–В	-0,068	0,083	<b>0,845</b>	<b>1,000</b>	0,082
А–С	-0,192	0,064	0,427	<b>1,000</b>	0,202
В–С	<b>0,901</b>	<b>0,971</b>	0,255	<b>1,000</b>	0,373

Как видно из табл. 9, значимая корреляционная связь между значениями  $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$  в исправных и неисправных вводах не выявлена, что свидетельствует о разном характере изменения данных показателей во вводах с разным состоянием. В тоже время, характер изменения во времени значений  $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$  в исправных вводах (фазы В–С) совпадает, о чем свидетельствуют значения коэффициентов парной корреляции из табл. 9, а также зависимости данных показателей приведенных на рис. 2. (а). Следует отметить, что несмотря на неисправность ввода фазы А, выявлена значимая корреляционная связь между емкостью основной изоляции вводов на фазе А и фазе В. В тоже время значимая связь между емкостями основной изоляции исправных вводов на фазах В и С отсутствует. Кроме того, характер изменения значений емкости  $C_2$ , для всех трех вводов полностью совпадает, о чем свидетельствуют как значения коэффициентов парной корреляции из табл. 9, так и зависимости данного показателя от продолжительности эксплуатации, которые приведены на рис. 2 (б). Выполненный анализ не выявил значимой корреляции между значениями сопротивления измерительного вывода для вводов во всех трех фазах (см. табл. 9 и рис. 2 (в)).

Аналогичные результаты получены и для неисправных высоковольтных вводов негерметичной кон-

струкции. В качестве примера в табл. 10–11 приведены результаты корреляционного анализа для высоковольтного ввода типа БМВП – 110, установленного на фазе С выключателя 110 кВ У 110–2000–50У1. Данный ввод был выведен из эксплуатации 02.09.2015 по результатам контроля значения  $tg\delta_2$ . Как видно из табл. 10, из пяти показателей значимая связь с продолжительностью эксплуатации выявлена для четырех показателей. При этом значения  $tg\delta_1$ ,  $tg\delta_2$  и  $C_2$  значимо возрастают с ростом длительности эксплуатации, а значения  $C_1$  значимо снижаются.

Таблица 10 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции и длительностью эксплуатации и между отдельными показателями высоковольтного ввода БМВП – 110, негерметичной конструкции

Показатель	Корреляция между показателями и длительностью эксплуатации	$tg\delta_1$	$tg\delta_2$	$C_1$	$C_2$	R
$n=8, r_{крит. 0.95}=0,707$						
$tg\delta_1$	<b>0.800</b>	<b>1,00</b>	<b>0.760</b>	<b>-0.842</b>	0.543	<b>-0.715</b>
$tg\delta_2$	<b>0.751</b>	<b>0.760</b>	<b>1,00</b>	<b>-0.728</b>	0.419	<b>-0.514</b>
$C_1$	<b>-0.859</b>	<b>-0.842</b>	<b>-0.728</b>	<b>1,00</b>	-0.660	0,636
$C_2$	<b>0.855</b>	0.543	0.419	-0.660	<b>1,00</b>	0.148
R	-0.264	<b>-0.715</b>	-0.514	0,636	0.148	<b>1,00</b>

Примечание:  $n$  – количество измерений

Из табл. 10 также видно, что значимая корреляционная связь выявлена не только между показателями, имеющими значимую связь с продолжительностью эксплуатации ( $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$ ;  $tg\delta_1$  и  $C_1$ ;  $tg\delta_2$  и  $C_1$ ), но и между  $tg\delta_1$  и R, при том, что сопротивление измерительного вывода не имеет значимой связи с длительностью эксплуатации. Более того, несмотря на то, что и емкости  $C_1$  и  $C_2$ , значимо изменяются во времени, корреляционная связь между этими показателями не выявлена.

В табл. 11 приведены результаты корреляционного анализа между показателями изоляции неисправного ввода (фаза С) и исправных вводов установленных на фазах А и В. Как следует из табл.11 характер зависимостей  $tg\delta_1$ ,  $tg\delta_2$ ,  $C_2$  и R от длительности эксплуатации в исправных вводах совпадает, но отличаются от характера зависимостей данных показателей для неисправного ввода (см. рис. 3 а). В тоже время характер зависимостей емкости основной изоляции от длительности эксплуатации, для исправного ввода фазы В и неисправного ввода фазы С совпадает (см. рис. 3 б). Таким образом, для неисправных высоковольтных вводов как герметичной, так и негерметичной конструкции характерно наличие значимой корреляции между показателями изоляции и продолжительностью эксплуатации, наличие значимой корреляции между показателями изоляции, а также отсутствие значимой корреляции между показателями неисправного ввода и показателями исправных вводов, установленных на соседних фазах.

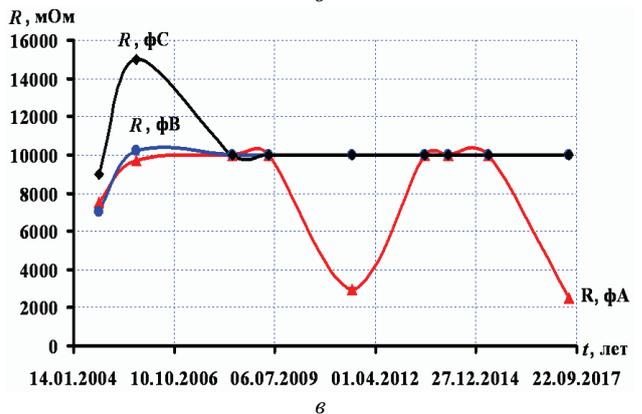
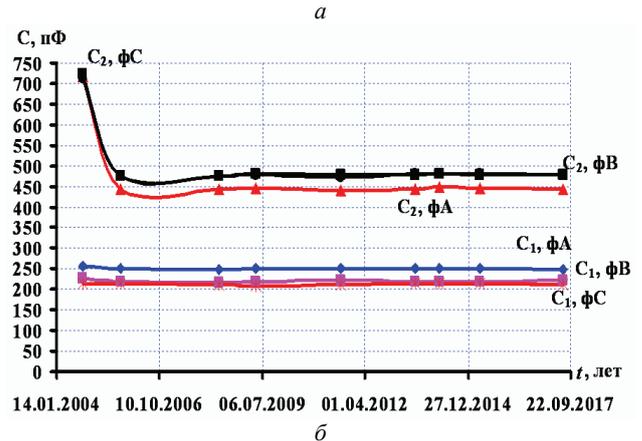
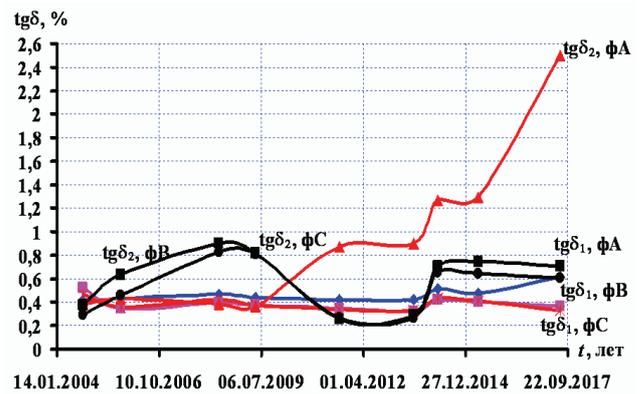


Рис.2. Зависимости показателей изоляции от длительности эксплуатации для неисправного ввода ГМТА–110/630–У1 110 кВ (фаза А) и исправных вводов (фазы В и С): а –  $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$ ; б –  $C_1$  и  $C_2$ ; в – R

Таблица 11 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции неисправного ввода БМВП – 110 кВ (фаза С), и показателями исправных вводов установленных на соседних фазах (А и В)

	$tg\delta_1/tg\delta_1$	$tg\delta_2/tg\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n=8, r_{крит. 0.95}=0,707$					
<b>-В</b>	<b>0,923</b>	<b>0,758</b>	0,244	<b>0,792</b>	<b>0,935</b>
<b>А-С</b>	-0,323	-0,471	0,355	0,075	0,470
<b>В-С</b>	-0,069	-0,388	<b>0,979</b>	0,653	0,691

Для сравнения в табл. 12-13 приведены результаты корреляционного анализа для исправного высоковольтного ввода герметичной конструкции ГМТА–90–110/1000 установленного на фазе А автотрансформатора АТДЦТН–200000/330/110.

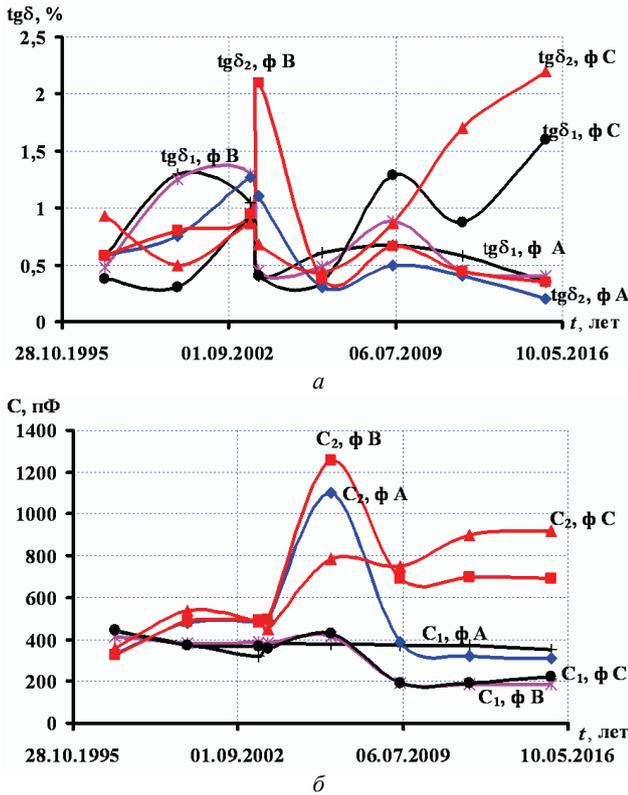


Рис. 3. Зависимости показателя изоляции от длительности эксплуатации для неисправного ввода ГМТА-110/630-У1 110 кВ (фаза А) и исправных вводов (фазы В и С): а) –  $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$ ; б) –  $C_1$  и  $C_2$

Таблица 12 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции и длительностью эксплуатации, также между отдельными показателями исправного ввода ГМТА – 90–110/1000

Показатель	Корреляция между показателями и длительностью эксплуатации	$tg\delta_1$	$tg\delta_2$	$C_1$	$C_2$	R
$n=10 r_{крит. 8, 0.95}=0,632$						
$tg\delta_1$	-0,255	<b>1,00</b>	-0,444	-0,132	-0,022	0,110
$tg\delta_2$	0,221	-0,444	<b>1,00</b>	0,145	0,104	-0,010
$C_1$	0,271	-0,132	0,145	<b>1,00</b>	0,505	0,583
$C_2$	0,104	-0,022	0,104	0,505	<b>1,00</b>	0,211
R	-0,439	0,110	-0,010	0,583	0,211	<b>1,00</b>

Как видно из табл. 12, для исправных вводов отсутствует значимая корреляция между продолжительностью эксплуатации и значениями показателей изоляции. Также отсутствует значимая корреляция между значениями показателей.

Следует отметить, что в некоторых исправных вводах была выявлена значимая корреляционная связь между значениями  $C_1$  и  $C_2$ , однако значимая связь между остальными показателями отсутствует. Анализируя данные приведенные в табл. 13, легко увидеть, что для исправных высоковольтных вводов имеет место наличие значимой корреляции между значениями показателей для всех трех фаз, исключение может составлять сопротивление измерительного вывода.

Таблица 13 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции исправного высоковольтного ввода ГМТА – 90–110/1000 (фаза А) и показателями исправных вводов, установленных на соседних фазах (В и С)

	$tg\delta_1/tg\delta_1$	$tg\delta_2/tg\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n=12 r_{крит. 10, 0.95}=0,576$					
-В	<b>0,870</b>	<b>0,929</b>	<b>0,740</b>	<b>0,686</b>	0,519
А-С	<b>0,781</b>	<b>0,963</b>	<b>0,892</b>	<b>0,897</b>	<b>1,000</b>
В-С	<b>0,968</b>	<b>0,968</b>	<b>0,871</b>	<b>0,755</b>	0,519

На рис. 4 приведены зависимости показателей изоляции от длительности эксплуатации для исправного ввода ГМТА–90–110/1000 (фаза А) и исправных вводов (фазы В и С).

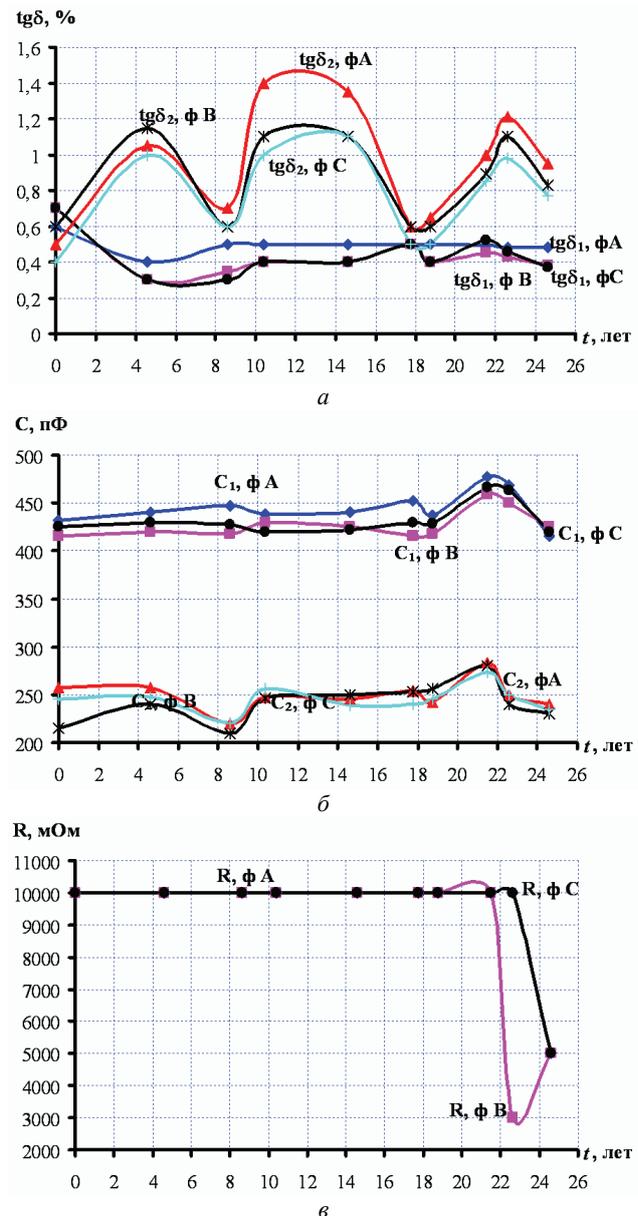


Рис. 4. Зависимости показателей изоляции от длительности эксплуатации для исправного ввода ГМТА-90-110/1000 (фаза А) и исправных вводов (фазы В и С): а) –  $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$ ; б) –  $C_1$  и  $C_2$ ; в) – R;

Как видно из рис.4, значения показателей изоля-

ции в исправных вводах, установленных на разных фазах, несколько отличаются, что может привести к росту тока небаланса, при непрерывном контроле состояния вводов неравномерно – компенсационным методом. В тоже время динамика изменения показателей изоляции во времени идентична, что позволяет более точно выполнять сравнение состояния изоляции вводов установленных на соседних фазах оборудования. Как показывают результаты регрессионного анализа, которые приведены в табл. 5–6, для исправных высоковольтных вводов может иметь место значимая зависимость показателей от продолжительности эксплуатации.

В связи с этим представляет практический интерес проанализировать корреляционные связи между продолжительностью эксплуатации и показателями изоляции, а также между отдельными показателями в таких вводах. А также проанализировать корреляционные связи между показателями во вводах, установленных на соседних фазах оборудования. В качестве примера проанализируем корреляционные связи в исправном высоковольтном вводе негерметичной конструкции типа БМТ–110/600, установленном на фазе А силового трансформатора. По результатам регрессионного анализа для данного ввода выявлено наличие значимой систематической составляющей тангенса угла диэлектрических потерь на продолжительность эксплуатации. Результаты корреляционного анализа показателей для данного ввода приведены в табл. 14 и 15. А зависимости показателей изоляции от продолжительности эксплуатации приведены на рис. 5.

Таблица 14 – Результаты анализа корреляционных связей между значениями показателей изоляции и длительностью эксплуатации и между отдельными показателями исправного ввода БМТ–110/600

Показатель	Корреляция между показателями и длительностью эксплуатации	$tg\delta_1$	$tg\delta_2$	$C_1$	$C_2$	R
$n=12 r_{крит. 10, 0,95}=0,576$						
$tg\delta_1$	<b>0,814</b>	<b>1,00</b>	-0,288	0,372	0,271	-0,090
$tg\delta_2$	-0,147	0,288	<b>1,00</b>	0,003	0,118	-0,455
$C_1$	0,478	0,372	0,003	<b>1,00</b>	<b>0,961</b>	-0,362
$C_2$	0,308	0,271	0,118	<b>0,961</b>	<b>1,00</b>	-0,411
R	0,027	0,090	-0,455	-0,362	-0,411	<b>1,00</b>

Таблица 15 – Корреляционные связи между значениями показателей изоляции исправного ввода БМТ–110/600 (фаза А) и показателями исправных вводов установленных на соседних фазах (В и С)

	$tg\delta_1/tg\delta_1$	$tg\delta_2/tg\delta_2$	$C_1/C_1$	$C_2/C_2$	R/R
$n=12 r_{крит. 10, 0,95}=0,576$					
<b>-В</b>	<b>0,693</b>	<b>0,891</b>	<b>0,958</b>	<b>0,833</b>	<b>0,907</b>
<b>А-С</b>	<b>0,744</b>	<b>0,747</b>	-0,141	0,308	<b>0,936</b>
<b>В-С</b>	<b>0,812</b>	<b>0,801</b>	0,086	0,652	<b>0,978</b>

Как видно из таблю 14, значимая корреляция между показателями изоляции и длительностью экс-

плуатации выявлена только для  $tg\delta_1$ . При этом данный показатель не имеет статистически значимой связи ни с одним другим показателем. Значимая связь выявлена только для показателей  $C_1$  и  $C_2$ , что характерно для исправных вводов. Анализируя данные табл. 15 легко увидеть, что практически все показатели изоляции вводов установленных на соседних фазах значимо коррелированы между собой, что наглядно иллюстрируют зависимости, приведенные на рис. 5. Это свидетельствует о том, что рост значений  $tg\delta_1$  как во вводе фазы А, так и во вводах на соседних фазах обусловлен одной и той же причиной, чего не наблюдается в неисправных вводах.

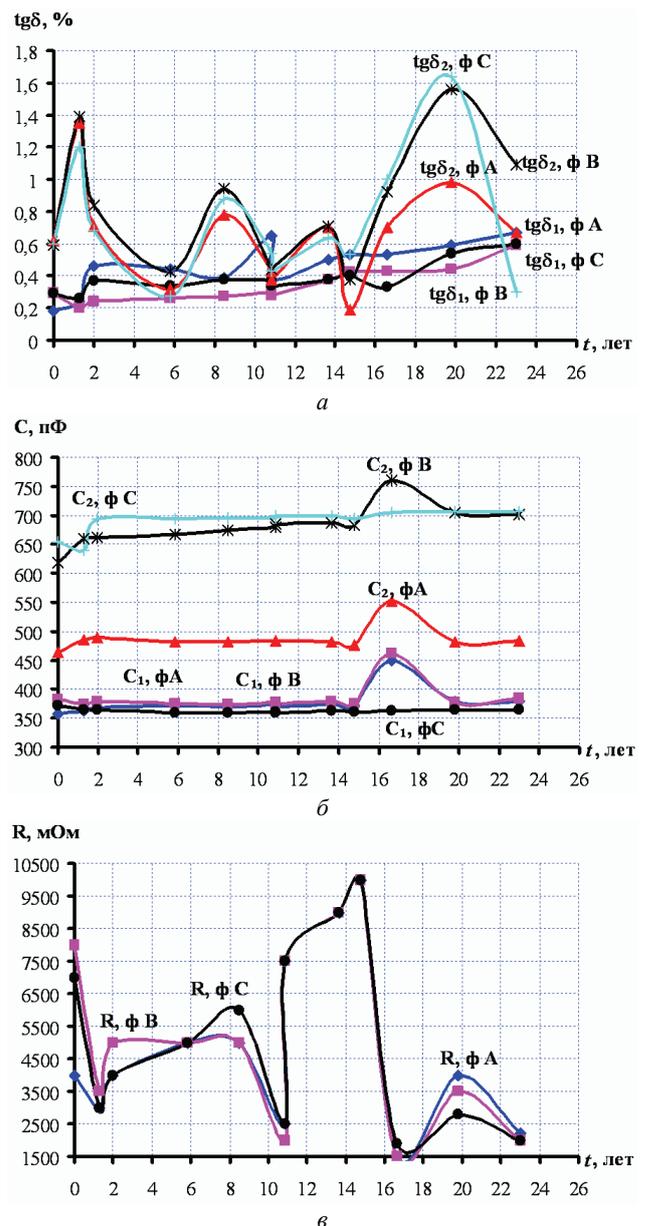


Рис. 5. Зависимости показателей изоляции от длительности эксплуатации для исправного ввода БМТ–110/600 (фаза А) и исправных вводов (фазы В и С)  
а –  $tg\delta_1$  и  $tg\delta_2$ ; б –  $C_1$  и  $C_2$ ; в – R

Более того, наличие значимой корреляции между значениями показателей в исправных вводах выявлено

и в тех случаях, когда значения показателей изоляции превышают предельно допустимые значения в результате нарушений при проведении испытаний. Последнее обстоятельство является крайне важным, поскольку позволяет установить причину роста значений показателей и минимизировать ошибочную отбраковку вводов. Таким образом, для исправных высоковольтных вводов как герметичной так и негерметичной конструкции характерно отсутствие значимой корреляции между показателями изоляции и продолжительностью эксплуатации, практическое отсутствие значимой корреляции между показателями изоляции (за исключением  $C_1$  и  $C_3$ ), а также наличие значимой корреляции между показателями изоляции вводов, установленных на соседних фазах. При наличии значимой корреляции между продолжительностью эксплуатации и одним из показателей изоляции в исправных вводах, как правило, имеет место наличие значимой корреляции между показателями вводов установленных на соседних фазах оборудования.

. Выполненные исследования показали, что в высоковольтных вводах с разным состоянием имеет место не только различие в численном значении показателей изоляции, что известно и широко используется, но и существенное различие в динамике изменения показателей во времени, что может быть использовано для диагностики состояния высоковольтных вводов. Так для исправных высоковольтных вводов как герметичной так и негерметичной конструкции характерно практическое отсутствие значимой систематической составляющей в зависимостях показателей от продолжительности эксплуатации (отсутствие значимой корреляции между показателями изоляции и продолжительностью эксплуатации), практическое отсутствие значимой корреляции между показателями изоляции (за исключением  $C_1$  и  $C_2$ ), а также наличие значимой корреляции между показателями изоляции вводов, установленных на соседних фазах. При наличии значимой корреляции между продолжительностью эксплуатации и одним из показателей изоляции в исправных вводах, как правило, имеет место наличие значимой корреляции между показателями вводов установленных на соседних фазах оборудования. Для неисправных высоковольтных вводов как герметичной, так и негерметичной конструкции характерно наличие значимой систематической составляющей в зависимостях показателей от продолжительности эксплуатации (наличие значимой корреляции между показателями изоляции и продолжительностью эксплуатации), наличие значимой корреляции между показателями изоляции, а также отсутствие значимой корреляции между показателями неисправного ввода и показателями исправных вводов, установленных на соседних фазах. Поскольку выявленные различия в характере зависимостей могут быть обнаружены еще до того, как значения показателей выйдут за предельно допустимые значения, то эти различия позволяют определять дефекты вводов на ранней стадии их развития.

1. Рубаненко О.С., Гуменюк О.І. Високовольтні вводи. Конструкція, експлуатація, діагностика і ремонт. Вінниця: ВНТУ, 2011. 183 с.
2. Жорняк Л.Б., Райкова Е.Ю., Осинская В.И. Повышение надежности и эффективности высоковольтных вводов. Вісник КДПУ імені Остроградського. 2008. Т. 4. С. 95–99.
3. Андриенко П.Д., Сахно А.А., Конограй С.П., Спица А.Г., Скрупская Л.С. Особенности мониторинга технического состояния основной изоляции высоковольтных вводов и трансформаторов тока. Електротехніка і електроенергетика. 2014. № 1. С. 43–48.
4. Кассихин С.Д., Сипилкин К.Г., Славинский А.З., Устинов В.Н., Пинталь Ю.С., Верещагин М.Б. Оценка эффективности и целесообразности диагностики высоковольтных вводов на основе опыта эксплуатации. Екатеринбург: Издательский дом «Автограф». 2010. 232 с.
5. Feilat E.A. Analysis of the Root Causes of Transformer Bushing Failures. Int. J. Comput. Electr. Autom. Control Inf. Eng. 2013. Vol. 7. PP. 791–796.
6. Anglhuber Martin, Velásquez Juan L. Contreras Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method. Transformer Magazine. Special Edition: Bushing. 2017. PP. 126–132.
7. Septyani H.I., Arifianto I., Purnomoadi A.P. High voltage transformer bushing problems. Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2011. International Conference on. IEEE. 2011. PP. 1–4.
8. Metwally I.A., Metwally I.A. Failures, monitoring and new trends of power transformers. IEEE Potentials. 2011. Vol. 30, iss. 03. PP. 36–43.
9. IEC – 60137. Edition 7.0 2017 – 06, International Electro-technical Commission Standard for Insulated bushings for Alternating Voltages Above 1000 V.
10. IEEE Std C57.19.01: Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings, 2000.
11. Норми випробування електрообладнання : СОУ-Н EE 20.302:2007. Офіц. вид., приказ Мінпаливенерго 2007-01-15 г. №13. Київ: ОЕП «ГРИФРЕ»: М-во палива та енергетики України, 2007. 262 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
12. Mehta Amit, Sharma R.N., Chauhan Sushil, Agnihotri S.D. Study the Insulation System of Power Transformer Bushing. International Journal of Computer and Electrical Engineering. August 2011. Vol. 3, no. 4. PP. 544–547.
13. Tan D., Li H., Xiao D. Analysis on Failure causes of bushing used in 40.5 kV metal enclosed air insulation switchgear. Electricity Distribution (CICED), 2014. China International Conference on. IEEE. 2014. С. 1225-1229.
14. Bo Qi, Quanmin Dai, Chengrong Li, Zipeng Zeng, Mingli Fu, Ran Zhuo The Mechanism and Diagnosis of Insulation Deterioration Caused by Moisture Ingress into Oil-Impregnated Paper Bushing. Energies. 2018. Т. 11, №. 6. PP. 1496. doi:10.3390/en11061496.
15. Бондаренко В.Е., Щапов П.Ф., Шутенко О.В. Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел. Харків: НТУ «ХПИ». 2007. 452 с.
16. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Оптимизация системы информационных показателей качества трансформаторного масла для технического эксплуатационного контроля маслonaполненного энергетического оборудования. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Харків: УДАЗТ. 2003. №2. С. 46–50.
17. Бондаренко В.О., Шутенко О.В. Усовершенствование процедуры принятия решений при оценке степени ста-

рения трансформаторных масел. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 1. С. 17 – 21.

18. Шутенко О.В. Метод обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. Электрические сети и системы. 2010. № 3. С. 38–45.

19. Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. Acta Electrotechnica et Informatica. 2018. Vol. 18, № 1. PP. 11–8. doi: 10.15546/aei-2018-0002.

20. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. М.: Мир. 1981. 520 с.

21. Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных. Харьков: НТУ «ХПИ». 2013. 268 с.

22. Шутенко О.В., Загайнова А.А., Сердюкова Г.Н. Анализ влияния условий и режимов эксплуатации на техническое состояние основной изоляции высоковольтных вводов различной конструкции. Электротехника і електро механіка. Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 1. С. 33–42. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.08.

23. Кенделл М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. Москва: Наука, 1976. 736 с.

24. Seber G.A. Linear regression analysis. John Wiley and Sons: New York. London – Sydney – Toronto 1977. 456 p.

25. Шеффер Г. Дисперсионный анализ. Москва: Наука. 1980, 512с.

26. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва: Высш. шк., 1977. 479 с.

### References (transliterated)

1. Rubanenko O. Ye., Humenyuk O. I Vysokovol'tni vvody. Konstruktsiya, ekspluatatsiya, diahnostyka i remont [High-voltage bushing. Design, operation, diagnostics and repair]. Vinnytsya, VNTU. 2011. 183 p.

2. Zhornyak L.B., Raykova E.Yu., Osinskaya V.I. Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti vysokovol'tnykh vvodov [Increase in reliability and efficiency of high-voltage bushing]. Visnyk KDPU imeni Ostrohrads'koho. 2008. Vol. 4. PP. 95–99.

3. Andrienko P.D. Sakhno A.A., Konogray S.P., Spitsa A.G., Skrupskaya L.S. Osobennosti monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnoy izolyatsii vysokovol'tnykh vvodov i transformatorov toka [Features of monitoring of technical condition of the main isolation of high-voltage bushing and current transformers]. Elektrotehnika i elektroenerhetyka. 2014. No. 1. PP. 43–48.

4. Kassikhin S.D., Sipilkin K.G., Slavinskiy A.Z., Ustinov V.N., Pital' Yu.S., Vereshchagin M.B. Otsenka effektivnosti i telesoobraznosti diagnostiki vysokovol'tnykh vvodov na osnove opyta ekspluatatsii [Assessment of effectiveness and expediency of diagnostics of high-voltage inputs bushing on the basis of operating experience]. Ekaterinburg: Izdatel'skiy dom «Avto graf», 2010. 232 p.

5. Feilat E.A. Analysis of the Root Causes of Transformer Bushing Failures. Int. J. Comput. Electr. Autom. Control Inf. Eng. 2013. Vol. 7. PP. 791–796.

6. Anglhuber Martin, Velásquez Juan L. Contreras Dispersing the clouds – gain clear insight into your bushings using advanced diagnostics method. Transformer Magazine. Special Edition: Bushing. 2017. PP. 126–132.

7. Septyani H.I., Arifianto I., Purnomoadi A.P. High voltage transformer bushing problems. Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2011. International Conference on. IEEE. 2011. PP. 1–4.

8. Metwally I.A., Metwally I.A. Failures, monitoring and new trends of power transformers. IEEE Potentials. 2011. Vol. 30. iss. 03. PP. 36–43.

9. IEC – 60137, Edition 7.0 2017 – 06. International Electro-technical Commission Standard for Insulated bushings for Alternating Voltages Above 1000 V.

10. IEEE Std C57.19.01: Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Apparatus Bushings, 2000.

11. Normy vyprovuvannya elektroobladnannya: SOU-NEE 20.302:2007 [Norms of test of electric equipment: SOU-NEE 20.302:2007] Ofits. vyd., prykaz Minpalyvenerho 2007-01-15 h. No.13. Kyiv: OEP «HRYFRE»: M-vo palyva ta enerhetyky Ukrainy, 2007. 262 p.

12. Mehta Amit, Sharma R.N., Chauhan Sushil, Agnihotri S.D. Study the Insulation System of Power Transformer Bushing. International Journal of Computer and Electrical Engineering. August 2011. Vol. 3, No. 4. PP. 544–547.

13. Tan D., Li H., Xiao D. Analysis on Failure causes of bushing used in 40.5 kV metal enclosed air insulation switchgear. Electricity Distribution (CICED), 2014. China International Conference on. – IEEE. 2014. PP. 1225-1229.

14. Bo Qi, Quanmin Dai, Chengrong Li, Zipeng Zeng, Mingli Fu and Ran Zhuo The Mechanism and Diagnosis of Insulation Deterioration Caused by Moisture Ingress into Oil-Impregnated Paper Bushing. Energies. 2018. Vol. 11, no. 6. PP. 1496. doi:10.3390/en11061496.

15. Bondarenko V.E., Shchapov P.F., Shutenko O.V. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsionnogo izmeritel'nogo kontrolya transformatornykh masel [Increase in effectiveness of operational measuring monitoring of transformer oils]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2007. 452 p.

16. Bondarenko V.E., Shutenko O.V. Optimizatsiya sistemy informatsionnykh pokazateley kachestva transformatornogo masla dlya tekhnicheskogo ekspluatatsionnogo kontrolya maslonapolnennogo energeticheskogo oborudovaniya [Optimization of a system of information indicators of quality of a transformer oil for technical operational monitoring of an oil-filled power inventory]. Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti. Kharkiv: UDAZT, 2003. No. 2. PP. 46–50.

17. Bondarenko V.O., Shutenko O.V. Usovershenstvovaniye protsedury prinyatiya resheniy pri otsenke stepeni stareniya transformatornykh masel [Improvement of the procedure of a decision making at assessment of extent of aging of transformer oils]. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. 2009. No.1. PP. 17 – 21.

18. Shutenko O.V. Metod obnaruzheniya razvivayushchikhsya defektov vysokovol'tnykh transformatorov po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza rastvorenykh v masle gazov [Method of detection of the developing defects of high-voltage transformers by results of a stratographic analysis of the gases dissolved in oil]. Elektricheskie seti i sistemy. 2010. No. 3. PP. 38–45.

19. Shutenko O. Method for Detection of Developing Defects in High-Voltage Power Transformers by Results of the Analysis of Dissolved Oil Gases. Acta Electrotechnica et Informatica. 2018. Vol. 18, No. 1. PP 11–8. DOI: 10.15546/aei-2018-0002.

20. Dzhonson N., Lion F. Statistika i planirovaniye eksperimenta v tekhnike i nauke [Statistics and scheduling of an experiment in technique and science]. Moscow: Mir, 1981. 520 p.

21. Shutenko O.V., Baklay D.N. Planirovaniye eksperimental'nykh issledovaniy v elektroenergetike. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh [Scheduling of the pilot studies in power industry. Methods of data interpretation.]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 268 p.

22. Shutenko O.V., Zagaynova A.A., Serdyukova G.N.

Analiz vliyaniya usloviy i rezhimov ekspluatatsii na tekhnicheskoe sostoyanie osnovnoy izolyatsii vysokovol'tnykh vvodov razlichnoy konstruktzii [Analysis of influence of conditions and modes of operation on technical condition of the main isolation of high-voltage inputs of various design]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. No. 1. PP. 33–42. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.08.

23. Kendell M. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz i vremennyye ryady* [Multidimensional statistical analysis and time

series]. Moscow: Nauka, 1976. PP. 736.

24. Seber G.A. *Linear regression analysis*. John Wiley and Sons: New York. London – Sydney – Toronto, 1977. 456 p.

25. Sheffer G. *Dispersionnyy analiz* [Dispersion analysis]. Moscow: Nauka, 1980. 512 p.

26. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vyssh. shk., 1977. 479 p.

*Поступила (received) 25.04.2019*

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

(*Shutenko leg*) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3141-7709>, e-mail: [o.v.shutenko@gmail.com](mailto:o.v.shutenko@gmail.com)

(*Zagaynova Alexandra*) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри передачі електричної енергії, м. Харків, Україна, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8558-3211>, e-mail: [zagaynova@mail.com](mailto:zagaynova@mail.com)

... , ... , ... , ... , ...	Непосредственное возбуждение последовательного резонансного контура прямоугольными импульсами напряжения. Расчетные соотношения	3
... , ... , ... , ...	Расчетные соотношения для цилиндрической индукторной системы с внутренним бифилярным соленоидом	8
... , ...	Система НАТО оценки соответствия объектов вооружения и военной техники требованиям электромагнитной совместимости	12
... , ... , ... , ...	Влияние генерации колебаний полупроводниковых структур элементной базы технических средств на параметры внутренней электромагнитной совместимости в условиях воздействия внешнего электромагнитного излучения	20
... , ... , ... , ...	Физика обратимых отказов полупроводниковых структур при воздействии электромагнитных помех	26
... , ...	Адекватность результатов определения вероятности поражения прямым ударом молнии наземных конструкций путем испытаний на масштабной модели	31
... , ... , ...	Аналіз методів визначення напруги дотику заземлювальних пристроїв діючих енергооб'єктів	45
... , ... , ...	Дослідження модернізованого електроприводу електровоза ВЛ-80	51
... , ... , ... , ...	Вимірювач низькочастотних струмів радіозавад	55
... , ...	Диагностика состояния высоковольтных маслонаполненных вводов на основе анализа динамики изменения показателей изоляции во времени	62

## CONTENTS

<i>YU.V. Batygin, A.YU. Bondarenko, .F. Yeryomina, S.A. Shinderuk, G.S. Serikov</i>	Direct excitation of a sequential resonant circuit by rectangular pulse voltage. calculated relations	3
<i>YU.V. Batygin, A.YU. Bondarenko, S.A. Shinderuk, G.S. Serikov</i>	Design relationships for a cylindrical inductor system with an internal bifilar solenoid	8
<i>V.V. Kniaziev, V.I. Kravchenko</i>	NATO system to ensure the compliance of weapons and military equipment with the requirements of electromagnetic compatibility	12
<i>V.V. Knyazev, V.I. Kravchenko, L.V. Vavriv, V.V. Yakovenko</i>	Influence of mode of oscillation generation on electromagnetic compatibility of semiconductor structures in conditions of action of electromagnetic radiation	20
<i>V.V. Knyazev, V.I. Kravchenko, L.V. Vavriv, V.V. Yakovenko</i>	Physics of reversible failures of semiconductor structures under action of electromagnetic interference	26
<i>V.V.Kniaziev, S.I. Mel'nyk</i>	Adequacy of the results of determining the probability of damage by a direct shock of lightness of a ground-door design by means of tests on a scale model	31
<i>D.G.Koliushko, S.S. Rudenko, S.G. Buryakovsky</i>	Analysis of the methods for determining the touch voltage of the earthing arrangement of existing power plant	45
<i>A. Ozulu, O. Krasilnikov, O. Bochevar</i>	Research of modernized electric drive electric locomotiv VL-80	51
<i>JU. S. Nemchenko, I. P. L snij, A. I. Saraev, A.A. Guchenko</i>	Measuring low frequency currents	55
<i>O. Shutenko, A. Zagaynova</i>	Diagnostics of the state of high-voltage bushings based on the changes dynamics analysis in the indicators of insulation in time	62

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»  
СЕРІЯ: ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Збірник наукових праць

№ 18 (1343) 2019

Науковий редактор: Кравченко В.І., д-р техн. наук, професор  
Технічний редактор: Ваврів Л.В., канд. фіз.-мат наук, ст. наук. співр.  
Відповідальний за випуск: Шайда В.П., канд. техн. наук

: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.  
НТУ «ХПІ». НДПКІ «Молнія».  
Тел. (057) 707-63-09. E-mail: l.v.vavriv@gmail.com

Підп. до друку 14.07.2019 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,95. Облік.-вид. арк. 9,10.  
Тираж 300 пр. 1-й завод 1-100. Зам. № 23. Ціна договірна.

---

Друкарня ВАТ «Цифра Прінт».

Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.  
Адреса: 61166, м. Харків, вул. Данилевського, 30

---