

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

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

*Серія: Техніка та електрофізика
високих напруг*

№ 20 (1129) 2015

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2015

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 20 (1129). – 201 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

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

Координаційна рада:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.; О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.; П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.;

В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.; М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В. Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.; Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.;

Ю. В. ТИМОФІЄВ, д-р техн. наук, проф.; М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

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

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

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

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

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

В. В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, проф.;

В. В. РУДАКОВ, д-р техн. наук, проф.; І. В. ЯКОВЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 4 від 04 квітня 2015 р.

ISSN 2079-0740

© Національний технічний університет «ХПІ», 2015

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

НОВАЯ РЕЗИСТИВНАЯ СХЕМА ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Приведены результаты оценки основных параметров предложенной резистивной схемы защиты высоковольтных конденсаторов мощного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) многомодульного исполнения от аварийных сверхтоков. Показано, что такая схема защиты ЕНЭ не только в десятки раз ограничивает ток короткого замыкания через его конденсаторы в аварийном режиме работы ЕНЭ, но и предотвращает взрывообразное разрушение его защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60.

Ключевые слова: мощный емкостный накопитель энергии; высоковольтный импульсный конденсатор; высоковольтный защитный резистор; аварийный сверхток.

Введение. В [1] была рассмотрена резистивная схема защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных одномодульных емкостных накопителей энергии (ЕНЭ), используемых как для научных (например, в экспериментальной физике и сильноточной электронике [2]), так и электро-технологических целей (например, в силовой электроимпульсной обработке материалов и технике больших импульсных токов [3,4]). Одним из недостатков резистивной схемы защиты конденсаторов зарядно-разрядных цепей мощных одномодульных ЕНЭ согласно [1] является возможность высокоскоростного разрушения (взрыва) установленных на высоковольтных выводах конденсаторов ее графито-керамических постоянных резисторов типа ТВО-60 в аварийном режиме работы ЕНЭ. Такой режим работы мощного ЕНЭ может быть вызван электрическим пробоем внешней (внутренней) изоляции его конденсаторов и протеканием через них тока короткого замыкания, амплитуда которого может достигать сотен килоампер. Как правило, подобный пробой конденсаторов мощного ЕНЭ наблюдается в основном на стадии их относительно длительного заряда (при его продолжительности от десятков секунд до нескольких минут), когда напряженности электрического поля в их диэлектрике составляют около 100 кВ/мм [1,5]. В этой связи при практическом использовании высоковольтной сильноточной импульсной техники, базирующейся на ЕНЭ, возможны случаи, когда выделяющаяся за сотни микросекунд (практически мгновенно) на защитном резисторе типа ТВО-60 в аварийном режиме работы мощного ЕНЭ тепловая энергия W_p будет значительно превышать значение максимальной (критической) тепловой энергии W_k , многократно рассеиваемой подобным резистором от действия на него импульса тока микросекундного временного диапазона и численно состав-

© М.И. Баранов, 2015

ляющей для такого резистора при скважности импульсов тока в 100 с и более около 2,5 кДж [1,6]. Из опыта эксплуатации мощных ЕНЭ известно, что взрывообразное разрушение при этом на воздухе защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 может приводить к негативным последствиям как для элементов конструкции ЕНЭ, так и обслуживающего его персонала. Поэтому вопросы дальнейшего усовершенствования резистивной схемы защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощных ЕНЭ остаются актуальными задачами.

1 Постановка задачи и выбор защитной схемы. Рассмотрим зарядно-разрядную цепь мощного многомодульного ЕНЭ, содержащего параллельно включенные высоковольтные конденсаторы емкостью C , образующие m модулей, в каждом из которых размещено n данных конденсаторов (рис. 1). При этом $U_3 = U_0 \leq \pm 50$ кВ – зарядное напряжение параллельно включенных в каждом модуле n числа конденсаторов емкостью C ; R_3 – защитное сопротивление, собранное из k числа параллельно соединенных графито-керамических постоянных резисторов типа ТВО-60 номиналом R_{03} ; R_p – междумодульное (развязывающее) сопротивление, выполненное из высоковольтных графито-керамических постоянных резисторов типа ТВО-60 номиналом R_{0p} ; P_1, \dots, P_m – короткозамыкатели разрядных цепей отдельных модулей ЕНЭ; F – общий высоковольтный трехэлектродный управляемый воздушный коммутатор ЕНЭ [11]; ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих микросекундных импульсов на напряжение ± 100 кВ [11]; C_p – высоковольтный разделительный конденсатор (емкостью 180 пФ на напряжение ± 120 кВ) [11]; R_H, L_H – активное сопротивление и индуктивность электрической нагрузки.

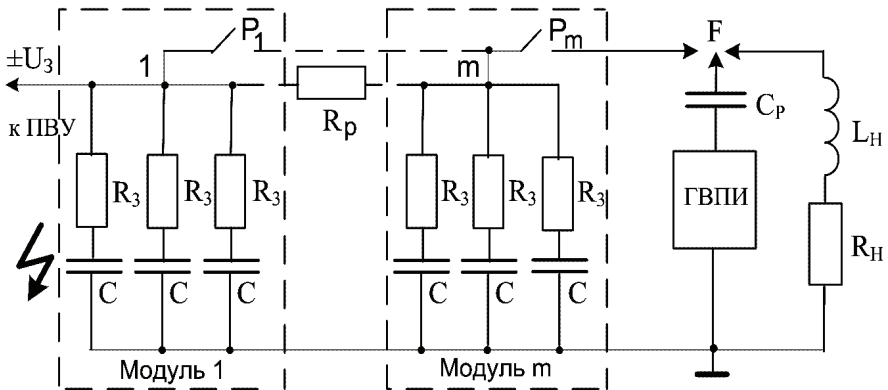


Рисунок 1 – Электрическая схема мощного ЕНЭ многомодульного исполнения с резистивной защитой высоковольтных конденсаторов в аварийном режиме его работы, вызванном пробоем изоляции одного из конденсаторов накопителя на рабочее напряжение U_0

Считаем, что в многомодульном мощном ЕНЭ конденсаторы емкостью C при номинальной энергоемкости W_0 каждого из них содержат резистивную защиту от аварийных сверхтоков, построенную на основе защитных сопротивлений R_3 . Пусть защитные сопротивления R_3 выполнены на основе высоковольтных графито-керамических объемных постоянных резисторов типа ТВО-60 и установлены на выводах конденсаторов ЕНЭ [1,6,7]. Принимаем, что каждое защитное сопротивление R_3 собрано из k числа параллельно соединенных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 номиналом R_{03} , а суммарное активное сопротивление низкоомной (высокоомной) сильноточной разрядной цепи мощного ЕНЭ с учетом влияния защитных сопротивлений R_3 оказывается равным R_C . Полагаем, что рассматриваемый ЕНЭ при общей номинальной энергоемкости W_{mn} состоит из m модулей с номинальной запасаемой энергией W_m , а каждый модуль содержит n число параллельно включенных конденсаторов с номинальной запасаемой энергией W_0 . Пусть в режиме заряда от повысительно-выпрямительного устройства (ПВУ) конденсаторов модули ЕНЭ между собой соединены междумодульными активными сопротивлениями $R_p \gg R_3$, выполненными также из высоковольтных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 номиналом R_{0p} . Для предотвращения влияния междумодульных сопротивлений R_p на амплитудно-временные параметры (АВП) формируемых на активно-индуктивной нагрузке при разряде конденсаторов отдельных модулей ЕНЭ импульсов тока в разрядных цепях его модулей применим короткозамыкатели P_1, \dots, P_m с электроприводом, подключающие в разрядном режиме согласно рис. 1 данные модули к общему управляемому коммутатору F ЕНЭ. Требуется применительно к предлагаемой резистивной схеме защиты высоковольтных конденсаторов ЕНЭ от аварийных сверхтоков разработать инженерно-технический подход по приближенному выбору величины сопротивлений R_3 , числа n защитных сопротивлений R_3 , выполненных из графито-керамических резисторов типа ТВО-60 (соответственно и числа параллельно включенных конденсаторов в каждом m -ом модуле ЕНЭ), а также числа m параллельно работающих модулей ЕНЭ с суммарной энергоемкостью W_{mn} его конденсаторной батареи на общую RL -нагрузку без электротеплового разрушения (взрыва) в аварийном режиме на стадии заряда от ПВУ ее конденсаторов используемых в ней защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60.

2 Приближенный расчет величины защитного сопротивления R_3 в модуле ЕНЭ. В аварийном режиме работы мощного ЕНЭ модульной конструкции с резистивной защитой его высоковольтных импульсных конденсаторов от аварийного сверхтока, вызванного пробоем изоляции одного из конденсаторов ЕНЭ на стадии заряда от ПВУ их электрических емкостей C и достигающего в слабозатухающем колебательном режиме амплитуд в сотни килоампер [1], для аварийной сильноточной цепи поврежденного модуля ЕНЭ будет всегда выполняться неравенство, характерное для аperiodического

го режима разряда его неповрежденных конденсаторов [8,9]: $R_3 > 2[L_p/(n-1)C]^{1/2}$, где L_p – собственная индуктивность модуля ЕНЭ. Поэтому величина защитного сопротивления R_3 может быть найдена из следующего соотношения:

$$R_3 \approx U_3 / I_{mp}, \quad (1)$$

где U_3 – зарядное напряжение конденсаторов в модулях ЕНЭ; I_{mp} – амплитуда максимально допустимого для конденсаторов ЕНЭ аварийного тока.

Известно, что для наиболее характерных типов силовых импульсных конденсаторов (например, ИК-50-3 и ИМ2-5-140), используемых в схемах мощных ЕНЭ при формировании больших импульсных токов, величины их зарядного напряжения U_3 изменяются в диапазоне $\pm 5 \text{ кВ} \leq U_3 \leq \pm 50 \text{ кВ}$, а величины максимально допустимых амплитуд I_{mp} их разрядного тока – в диапазоне $\pm 2,5 \text{ кА} \leq I_{mp} \leq \pm 50 \text{ кА}$ [10]. Тогда из (1) для характерного применительно к рассматриваемой высоковольтной проблематике электрофизического случая ($U_3 = \pm 50 \text{ кВ}$; $I_{mp} = \pm 10 \text{ кА}$ [1,9]) следует, что значение защитного сопротивления R_3 , устанавливаемого на высоковольтный вывод каждого из конденсаторов m -го модуля мощного ЕНЭ, должно численно составлять около 5 Ом.

Для известного типа высоковольтных импульсных конденсаторов с заданными величинами U_3 и I_{mp} , применяемых в зарядно-разрядных цепях мощных ЕНЭ, и определенного по (1) защитного сопротивления R_3 для числа k параллельно соединенных на каждом высоковольтном выводе используемых конденсаторов графито-керамических резисторов типа ТВО-60 находим:

$$k \approx R_{03}/R_3. \quad (2)$$

Из (2) при $R_3 \approx 5 \text{ Ом}$ и широко применяемом на практике номинале R_{03} защитного высоковольтного резистора типа ТВО-60-24 Ом [7] получаем, что численное значение числа k будет находиться в диапазоне $4 \leq k \leq 5$. Из опыта разработки и создания в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» в последние годы мощных одномодульных ЕНЭ на основе высоковольтных импульсных конденсаторов типа ИК-50-3 следует, что наиболее технологичным вариантом при практической реализации резистивной защиты их силовых импульсных конденсаторов от аварийных свертков является тот, при котором $k \approx 4$ [11].

3 Приближенный расчет числа защитных сопротивлений R_3 в модуле ЕНЭ. Результаты проведенных ранее в нашем институте экспериментальных исследований показали, что при нагреве в термическом шкафу графито-керамических резисторов типа ТВО-60-24 Ом в диапазоне температур от 20 до 160 °С их номинальное активное сопротивление $R_{03} = 24 \text{ Ом}$ изменяется не более чем на 5 % [6]. Причем, эти изменения имели знак «минус», что свидетельствует о незначительном уменьшении номинального активного сопротивления R_{03} этих резисторов при их нагреве в указанном температурном диапазоне. В связи с этим для тепловой энергии W_p , выделяющейся в защит-

ном сопротивлении R_3 при аварийном режиме работы мощного ЕНЭ много-модульного исполнения, можно записать такое приближенное соотношение:

$$W_p \approx R_3 \int_0^{\tau_p} i_p^2(t) dt, \quad (3)$$

где $i_p(t)$ – апериодический разрядный ток длительностью τ_p на уровне $0,5 \cdot I_{mp}$, проходящий в аварийном случае через графито-керамические резисторы типа ТВО-60 m -го модуля рассматриваемого мощного ЕНЭ.

Расчетно-экспериментальные данные, приведенные в [1,6,12], указывают на то, что апериодический импульс разрядного тока $i_p(t)$ в аварийном режиме работы рассматриваемого мощного ЕНЭ (при пробое одного из его конденсаторов) с резистивной защитой конденсаторов при $U_3 \leq \pm 50$ кВ достигает амплитудных значений до ± 10 кА, обычно имеет короткий микросекундный фронт и длинный миллисекундный спад. Такие АВП аварийного импульса тока $i_p(t)$ с заданной амплитудой I_{mp} в защитном сопротивлении R_3 позволяют с учетом упрощения (3) представить выражение для баланса тепловой энергии в графито-керамических резисторах типа ТВО-60, входящих в состав одного защитного сопротивления R_3 m -го модуля ЕНЭ, в следующем виде:

$$R_3 I_{mp}^2 \tau_p / 4 \approx k W_k, \quad (4)$$

где $\tau_p \approx 0,7 \cdot R_3 (n-1)C$ – длительность аварийного разрядного тока, протекающего через защитные резисторы типа ТВО-60 в схеме согласно рис. 1.

С учетом (2) после преобразований в (4) для числа n защитных сопротивлений $R_3 \approx R_{03}/k$ и соответственно числа конденсаторов емкостью C в каждом высоковольтном m -модуле ЕНЭ получаем следующее соотношение:

$$n \approx 6 k^3 W_k / (R_{03}^2 I_{mp}^2 C) + 1. \quad (5)$$

Видно, что полученное соотношение (5) при выбранных для каждого модуля мощного ЕНЭ численных значениях таких его параметров как емкости C конденсатора, амплитуды I_{mp} допустимого аварийного тока, номинала R_{03} защитного резистора типа ТВО-60, критического значения W_k рассеиваемой тепловой энергии одним защитным резистором типа ТВО-60 и числа k параллельно соединенных в одном защитном сопротивлении R_3 резисторов типа ТВО-60 определяет то максимальное число n параллельно включенных высоковольтных конденсаторов емкостью C , которое по условиям электротепловой стойкости защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60 может находиться в одном из m -ом модуле рассматриваемого нами ЕНЭ. Из (5) при использовании в мощном ЕНЭ импульсных конденсаторов типа ИК-50-3 ($U_3 = U_0 = \pm 50$ кВ; $C = 3$ мкФ), $R_{03} = 24$ Ом, $I_{mp} = \pm 10$ кА, $k = 4$ и $W_k = 2,5$ кДж находим, что число n защитных сопротивлений R_3 и соответственно максимальное количество параллельно включенных силовых конденсаторов в каждом m -ом модуле ЕНЭ принимает значение, равное примерно 7.

4 Приближенный расчет числа модулей в ЕНЭ с резистивной защитой. При заданных величинах энергоемкостей всех модулей ЕНЭ W_{mn} и каждого конденсатора ЕНЭ W_0 для числа m высоковольтных модулей в зарядно-разрядной цепи мощного ЕНЭ с резистивной защитой его конденсаторов от аварийного сверхтока можно записать следующее расчетное соотношение:

$$m \approx W_{mn} / (n W_0). \quad (6)$$

Из (6) с учетом (5) и указанных исходных данных ($C = 3$ мкФ; $R_{03} = 24$ Ом; $I_{mp} = \pm 10$ кА; $k = 4$; $W_k = 2,5$ кДж) следует, что применительно к мощному ЕНЭ ($W_{mn} \approx 420$ кДж) с резистивной защитой от аварийного сверхтока, содержащему импульсные конденсаторы типа ИК-50-3 ($W_0 = 3,75$ кДж [10]) и предназначенному для получения импульса тока искусственной линейной молнии [11], при $n \approx 7$ следует, что $m \approx 16$. Кольцевое соединение подобного числа модулей ЕНЭ между собой с их дальнейшим параллельным подключением согласно рис. 1 к общему коммутатору F и общей RL -нагрузке, размещенной в центральной части «кольца» модулей ЕНЭ, позволяет обеспечить достижение минимальных значений индуктивности цепи разряда модулей ЕНЭ.

5 Приближенный выбор междумодульного сопротивления R_p в ЕНЭ.

При выборе параметров междумодульных высоковольтных сопротивлений R_p в составе мощного ЕНЭ с резистивной защитой его конденсаторов от аварийного сверхтока требуется исключать возможность разряда конденсаторов числом $(m - 1)n$ неповрежденных модулей ЕНЭ на аварийный модуль с пробитым конденсатором. При этом междумодульные сопротивления R_p должны обеспечивать от ПВУ с собственным зарядным резистором через защитные сопротивления R_3 практически равномерный заряд параллельно включенных конденсаторов всех модулей мощного ЕНЭ до зарядного напряжения U_3 . С учетом указанных требований предлагается в многомодульном мощном ЕНЭ значение активного сопротивления всех междумодульных сопротивлений R_p , изготавливаемых на основе графито-керамических резисторов типа ТВО-60, определять из следующего приближенного соотношения:

$$R_p \approx 10 R_3. \quad (7)$$

Из (7) при ранее найденном в разделе 2 для мощного многомодульного ЕНЭ значении активного сопротивления высоковольтного защитного сопротивления $R_3 \approx 5$ Ом получаем, что активное сопротивление междумодульного сопротивления должно составлять примерно $R_p \approx 50$ Ом. Этому значению R_p соответствует графито-керамический резистор типа ТВО-60-51 Ом, рассчитанный на длительное воздействие постоянного рабочего напряжения до ± 25 кВ и рассеиваемую тепловую мощность по постоянному току до 60 Вт [6,7].

6 Приближенная оценка правильности выбора параметров резистивной защиты ЕНЭ. Оценивать правильность проведенного выбора основных параметров резистивной схемы защиты конденсаторов мощного ЕНЭ

от аварийного сверхтока на основе приведенных выше расчетных соотношений (1)–(7) предлагается по следующим двум инженерным критериям.

- *Энергетический критерий.* Этот критерий для m -го модуля мощного ЕНЭ, в котором может наступить пробой изоляции одного из его высоковольтных импульсных конденсаторов, можно записать в следующем виде:

$$W_0(n-1)/(kn) \leq W_k. \quad (8)$$

- *Резистивный критерий.* Данный критерий, учитывающий сравнение реального и требуемого по разработанной конструкторской документации значений активного сопротивления в сильноточной (особенно низкоомной) разрядной цепи ЕНЭ, можно сформулировать в таком приближенном виде:

$$R_{03}/(kmn) \leq R_C. \quad (9)$$

При не выполнении критериев (8) и (9) разработчику высоковольтной импульсной техники, к которой в полной мере относятся мощные ЕНЭ, необходимо, прежде всего, по расчетным соотношениям (2), (5) и (6) уточнить выбор соответственно параметров k , n и m . Затем с учетом соответствующего уточнения снова вернуться к указанным критериям (8) и (9) для окончательной оценки достоверности выбора количественных характеристик резистивной схемы защиты ЕНЭ, приведенной на рис. 1. При этом надо помнить то одно обстоятельство, что основным параметром в используемой нами схеме резистивной защиты ЕНЭ от аварийного сверхтока, подлежащим определенной первоочередной коррекции, будет являться номинал R_{03} защитного графито-керамического резистора типа ТВО-60, определяющий по (2) численное значение параметра k и далее соответственно по (5) и (6) – n и m .

Выводы. Предложена новая резистивная схема защиты высоковольтных импульсных конденсаторов мощного ЕНЭ многомодульного исполнения от аварийных сверхтоков, возникающих в отдельных модулях ЕНЭ при внутреннем (внешнем) пробое изоляции их конденсаторов. Разработан инженерно-технический подход по приближенному выбору основных параметров данной защитной схемы, обеспечивающей как существенное ограничение (в десятки раз) амплитуды аварийного сверхтока, протекающего через поврежденный конденсатор, так и исключающей взрывообразное разрушение на стадии заряда конденсаторов отдельных модулей ЕНЭ защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60, установленных на каждом высоковольтном выводе используемых в ЕНЭ силовых импульсных конденсаторов.

Список литературы: 1. *Баранов М.И.* Основные показатели термомеханической защиты высоковольтных конденсаторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии от аварийных сверхтоков // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 20-27. 2. *Месля Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с. 3. *Гулый Г.А.* Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 4. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с. 5. *Колушико Г.М.* Исследование и разработка систем защиты для емкостных накопителей энер-

гии. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Х.: 1981. – 218 с. **6.** Баранов М.И., Бочаров В.А., Носенко М.А. Предельные характеристики по рассеиваемой импульсной мощности и энергии высоковольтных керамических объемных резисторов типа ТВО-60 // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХП», 2007. – № 20. – С. 45–56. **7.** ГОСТ 11324-76. Резисторы постоянные объемные типа ТВО. – М.: Изд-во Госстандарта СССР, 1976. – 20 с. **8.** Нейман Л.П., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Т. 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с. **9.** Баранов М.И. Выбор и установка защитных высоковольтных керамических резисторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Серія: «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 13–20. **10.** Берзан В.П., Геликман Б.Ю., Гураевский М.Н. и др. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник / Под ред. Г.С. Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с. **11.** Баранов М.И., Колюшко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81–85. **12.** Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Т. 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Baranov M.I. Osnovnye pokazateli termomechanicheskoy zashhity vysokovol'tnyh kondensatorov v zarjadno-razrjadnyh cepjah moshhnyh emkostnyh nakopitelej jenerгии ot avarijnyh sverhtokov. Visnik NTU «KhPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. No 50 (1092). 20–27 Print. **2.** Mesjac G.A. Impul'snaja energetika i elektronika. Moscow: Nauka, 2004. 704 Print. **3.** Gulyj G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij. Kiev: Naukova dumka, 1990. 208 Print. **4.** Tehnika bol'shij impul'snyh tokov i magnitnyh polej. Pod red. V.S. Komel'kova. Moscow: Atomizdat, 1970. 472 Print. **5.** Koliushko G.M. Issledovanie i razrabotka sistem zashhity dlja emkostnyh nakopitelej energii. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Kharkiv: 1981. 218 Print. **6.** Baranov M.I., Bocharov V.A., Nosenko M.A. Predel'nye harakteristiki po rasseivaemoj impul'snoj moshhnosti i energii vysokovol'tnyh keramicheskij ob'emnyh rezistorov tipa TVO-60. Visnik NTU «KhPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». Kharkiv: NTU «KhPI», 2007. No 20. 45–56 Print. **7.** ГОСТ 11324-76. Rezistory postojannye ob'emnye tipa TVO. Moscow: Izd-vo Gosstandarta SSSR, 1976. 20 Print. **8.** Nejman L.R., Demirchjan K.S. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: V 2-h t. Uchebnik dlja vuzov. Vol. 1. Leningrad: Energoizdat, 1981. 536 Print. **9.** Baranov M.I. Vybory i ustanovka zashhitnyh vysokovol'tnyh keramicheskij rezistorov v zarjadno-razrjadnyh cepjah moshhnyh emkostnyh nakopitelej energii. Visnik NTU «KhPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija: «Tehnika ta elektrofizika visokih naprug». Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. No 50 (1092). 13–20 Print. **10.** Berzan V.P., Gelikman B.Ju., Guraevskij M.N. i dr. Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki: Spravochnik. Pod red. G.S. Kuchinskogo. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 656 Print. **11.** Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja naturalnyh ispytanij tehniceskijh ob'ektov. Pribory i tehnika jeksperimenta. 2008. No 3. 81–85 Print. **12.** Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. Vol. 3: Teorija i praktika elektrofizicheskijh zadach. Kharkiv: Tochka, 2014. 400 Print.

Надійшла (received) 19.03.2015

Л. З. БОГУСЛАВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доцент, зав. відділом ППТ НАН України, Миколаїв;
Д. В. ВІННИЧЕНКО, м. н. с. ППТ НАН України, Миколаїв;
Н. С. НАЗАРОВА, канд. техн. наук, доцент, с. н. с. ППТ НАН України, Миколаїв

ВИСОКОВОЛЬТНА УСТАНОВКА ДЛЯ СИНТЕЗУ НАНОВУГЛЕЦЮ З ONION-LIKE СТРУКТУРОЮ З СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГАЗОВОГО РОЗРЯДУ

Проведено аналіз умов, необхідних для електророзрядного синтезу нановуглецю. Обґрунтовано використання оптимальної системи керування електричними характеристиками газового розряду. Розроблено генератор високовольтних імпульсів, який дозволяє отримувати необхідний широкий діапазон електричних характеристик розрядних імпульсів. Розроблено базове технологічне рішення для реалізації електророзрядного височастотного способу синтезу аморфного нановуглецю з onion-like структурою і виготовлено експериментальну високовольтну установку.

Ключові слова: височастотний електророзрядний синтез, аморфний нановуглець з onion-like структурою, система оптимального керування, електричні характеристики газового розряду, високовольтна технологічна установка.

Вступ. Сучасні тенденції в розвитку машинобудування та електронної промисловості передбачають збільшення засобів використання вуглецевих наноматеріалів. Зростаючі потреби у вуглецевих наноматеріалах в різних галузях науки і промисловості обумовлені великою різноманітністю фізико-хімічних, оптичних, механічних і електричних властивостей. Найвні експериментальні результати свідчать про істотне поліпшення триботехнічних властивостей мастил і керамічних покриттів при їх модифікації наночастинками вуглецевих наноматеріалів. Надмалі частинки неабразивного нановуглецевого порошку діють як сухе мастило, захищаючи від задирів і пітінгової корозії, до того ж неабразивний порошок не зрізує вершини мікрорельєфу, а розплющує їх, збільшуючи поверхневу міцність і знижуючи тертя і знос. Також нановуглець з onion-like структурою є перспективним матеріалом для створення хімічних джерел енергії високої густини та суперконденсаторів ([1, 2]). Зокрема, унікальні електричні і магнітні властивості нановуглецевих форм з onion-like структурою викликають значний інтерес виробників електронних засобів і захисних екранів.

Тривалі й широкомасштабні дослідження в області розробки методів синтезу нановуглецю не дозволили створити технологію швидкого і якісного одержання макрокілкости матеріалу, яка необхідна для промислових маш-

© Л. З. Богуславський, Д. В. Вінниченко, Н. С. Назарова, 2015

табів виробництва. Відомі на цей час методи отримання нановуглецю з onion-like структурою є дуже енергозатратними (лазерне випаровування) [3] або мають сировину високої вартості (отжиг нааноалмазів) [4]. Існує ряд способів отримання нановуглецю за допомогою електророзрядного синтезу в буферному газовому середовищі [5, 6], але більш продуктивним є метод лазерного випаровування. Попри всі позитиви відомі методи отримання вуглецевих наноматеріалів все ж мають недоліки, до основних з яких можна віднести високу собівартість, низьку продуктивність і складний технологічний процес, що включає операції очищення та збагачення. Тобто, незважаючи на значне число робіт у цій галузі, проблеми чистоти отриманого продукту, від якої залежать чутливі електрофізичні властивості, та продуктивності синтезу вуглецевих onion-like наноструктур залишаються актуальними.

Метою роботи є розвиток теоретичних основ і технічних засобів високочастотного електророзрядного синтезу аморфного нановуглецю з onion-like структурою і створення на цій основі високовольтної технологічної установки із системою оптимального керування електричними характеристиками газового розряду.

Для досягнення поставленої мети розв'язано наступні завдання:

- розроблено базове технологічне рішення по реалізації способу отримання нановуглецю з вуглецевмісного газу високочастотним способом синтезу;
- розроблено і виготовлено генератор високовольтних імпульсів, що забезпечує широкодіапазонне регулювання характеристик розрядних імпульсів, напругою до 20 кВ з регульованою частотою від 20 до 100 кГц;
- розроблено систему керування електричними характеристиками газового розряду для підвищення виходу нановуглецю;
- розроблено і виготовлено два реактори з електродними системами, забезпеченими електромагнітним приводом для стабілізації режиму синтезу нановуглецю;
- розроблено і виготовлено систему керування установки, яка забезпечує керування роботою установки, індикацію режимів роботи і захист в аварійних ситуаціях.

Матеріали дослідження. Розроблений раніше спосіб синтезу нановуглецю [7] з вуглецевмісного газу в плазмі високочастотного імпульсно-періодичного розряду, який протікає в міжелектродному проміжку, розташованому в реакторі, заповненому вуглецевмісним газом, за допомогою високовольтного генератора розрядних імпульсів має ряд переваг. Це можливість отримання частинок вуглецю з розмірами від 10 до 30 нм, у тому числі, з onion-like структурою, з високою чистотою отриманого продукту (більше 96% вуглецю в досліджених зразках, інше – вода) [8, 9].

Подальший розвиток цього способу вимагає розробки базових рішень

для забезпечення технологічних операцій (підведення сировини, збирання продуктів реакції, підтримання режиму синтезу).

Розроблений в даній роботі базовий технологічний процес містить наступні операції:

а) синтез нановуглецю (здійснюється безперервно);

б) допоміжні операції:

1) подача газу з регульованою витратою (здійснюється безперервно);

2) фільтрація твердих продуктів синтезу і виведення газоподібних продуктів реакції (здійснюється безперервно);

3) збір продуктів реакції (здійснюється після відключення установки від живлення і припинення попередніх операцій).

Усі складові частини установки, за винятком виносного пульта управління, повинні знаходитися в окремому приміщенні (реакторній) і мати хороший візуальний огляд під час роботи установки.

Принцип дії установки базується на синтезі нановуглецю з вуглецевовмісного газу в нерівноважній плазмі електричного газового розряду, який формується в міжелектродному проміжку, розташованому в реакторі, заповненому вуглецевмісним газом, за допомогою високовольтного генератора розрядних імпульсів. Максимальна частота імпульсів струму 100 кГц.

Відповідно до наведених операцій одночасно в безперервному режимі працюють газова система, принципова схема якої наведена на рис. 1 і електротехнічний комплекс, електрична структурна схема якого наведена на рис. 2. Для здійснення подачі газу з регульованою витратою використовуються стандартні газовий балон, вхідний газовий вентиль і понижуючий редуктор. Регулювання витрат газу здійснюється вручну за допомогою вхідного газового вентиля.

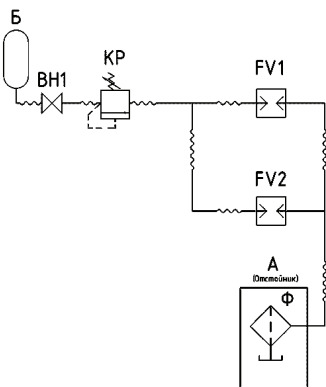


Рисунок 1 – Принципова схема газової системи: Б – газовий балон; ВН1 – вхідний вентиль; КР – понижуючий редуктор; FV1, FV2 – реактори; А-Ф – відстойник з фільтром

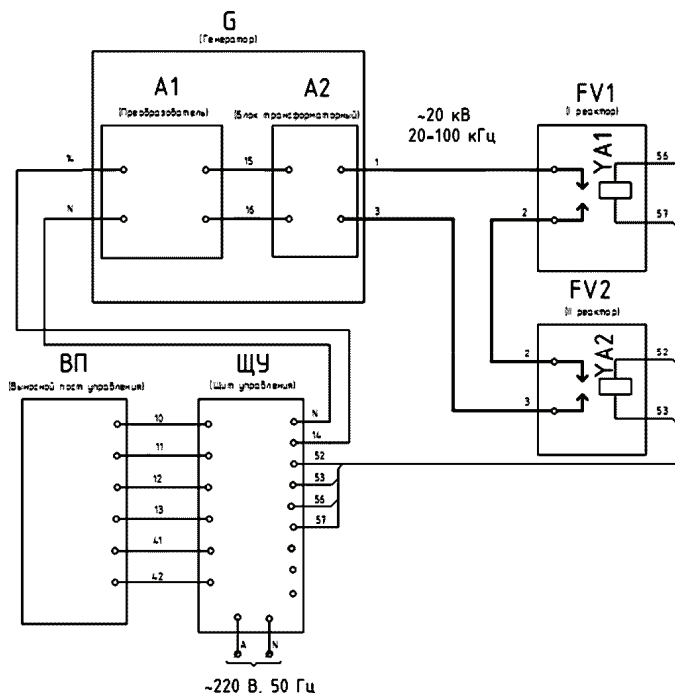


Рисунок 2 – Електрична структурна схема електротехнічного комплексу: G – генератор високовольтних імпульсів; FV1, FV2 – реактори; ВП – виносний пульт керування; ЩУ – щит управління з панеллю керування

Для вилучення твердих продуктів синтезу проводиться їх фільтрація за допомогою розробленого фільтра. Очищені від нановуглецю газоподібні продукти реакції виводяться в утилізатор.

Схема електрична структурна включає в себе високовольтне електрообладнання, власне генератор високовольтних імпульсів, і низьковольтне електрообладнання - елементи управління високовольтним електрообладнанням.

Панель керування показано на рис. 3, виносний пульт керування показано на рис. 4.

Базове технологічне рішення по реалізації способу отримання нановуглецю з вуглецевмісного газу високочастотним способом синтезу містить такі етапи.

- 1 Підготовка установки до експлуатації.
2. Перевірка систем.
3. Попередня установка початкових значень технологічних параметрів при виключеній установці.
4. Установка робочої сумарної довжини міжелектродного проміжку.

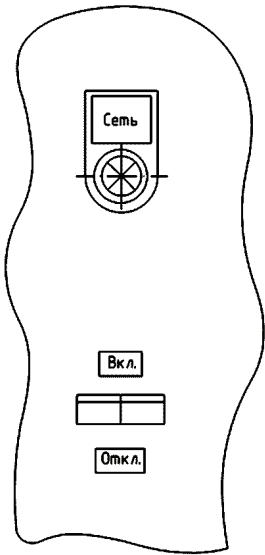


Рисунок 3 – Панель керування

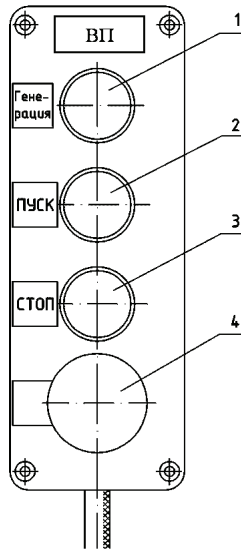


Рисунок 4 – Виносний пульт керування: 1 – індикатор режиму генерації високовольтних розрядних імпульсів «Генерація»; 2 – кнопка включення режиму генерації імпульсів «Пуск»; 3 – кнопка відключення режиму генерації імпульсів «Стоп»; 4 – кнопка аварійного відключення установки «Аварійний стоп»

5. Налаштування газової системи.
6. Вибір режим роботи установки.
7. Включення режиму генерації розрядних імпульсів за допомогою кнопки «Пуск» на виносному посту управління (див. рис. 4).

Час обробки газу залежить від частоти і споживаної потужності і може складати від 30 до 50 хв (за результатами попередніх випробувань).

Обробка газу може проводитися до тих пір, поки температура на поверхні реактора не досягне значення 90 °С. Температура контролюється за допомогою інфрачервоного термометра.

При закінченні оптимального часу обробки або досягненні на поверхні реактора температури 90 °С відключається генерація високовольтних розрядних імпульсів.

8. Вимкнення установки.
9. Збір порошку.

Розробка генератора високовольтних імпульсів. Одною з основних складових частин установки для синтезу нановуглецю є генератор високово-

льтних імпульсів.

В [10] показано, що для технології отримання нановуглецю електророзрядним методом з газоподібних вуглеводнів джерело живлення повинно мати вихідну напругу холостого ходу для ініціювання розряду не меншу, ніж 2 кВ/мм, а робочу – 0,11 кВ/мм. Тобто генератор розрядного струму і система керування на протязі кожного імпульсу струму повинні забезпечити діапазон напруги, що має границі, які відрізняються в 20 разів.

В [11] показано, що для реалізації необхідних режимних характеристик високовольтної електророзрядної системи необхідно виконати наступні умови.

1. Стабілізувати потужність на рівні

$$P_S(I_{ED}) = U_{CN}(I_{ED}) \cdot I_{CN_RMS}(I_{ED}), \quad (1)$$

за допомогою стабілізації струму I_{CH_RMS} .

2. Забезпечити напругу пробою міжелектродного проміжку на рівні

$$U_{DCH}(I_{ED}) = E_{DCH} \cdot I_{ED}, \quad (2)$$

а робочу напругу синтезу на рівні

$$U_{CH}(I_{ED}) = E_{CH} \cdot I_{ED}, \quad (3)$$

де

$$U_{DCH} / U_{CH} \approx 20. \quad (4)$$

Тобто, стабілізація режимних характеристик повинна відбуватись в широких межах, що вимагає побудови джерела живлення з широкодіапазонним регулюванням характеристик високовольтних розрядних імпульсів.

В [11] також показано, що забезпечити наведені вимоги можна з використанням джерела стабілізованого струму, який використовує так званий послідовний резонансний контур на частоті живлення.

Зокрема за умовою прямокутних (негармонійних) імпульсів на виході джерела живлення, отримано залежності:

$$i_R = \frac{4 \cdot U_m}{\pi \omega L} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t)}{n \sqrt{n^2 + k^2(n^2 - 1)^2}}, n = 1, 3, 5, \dots, \quad (5)$$

$$U_R = \frac{4 \cdot U_m \cdot k}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t)}{n \sqrt{n^2 + k^2(n^2 - 1)^2}}, n = 1, 3, 5, \dots, \quad (6)$$

де $k = R / \omega L$ - коефіцієнт приведенного навантаження; n – номер гармоніки, ω – циклічна частота першої гармоніки, U_m – напруга прямокутного імпульсу на виході джерела живлення.

Відповідно до (5), (6) залежність вихідного струму гармоніки n від навантаження визначається тільки величиною коефіцієнта k , при цьому коефіцієнт несинусоїдальності не перевищує 4 %, тому, з незначною похибкою у розрахунках, можна вважати домінуючою складовою струму навантаження першу гармоніку.

Дослідження середньоквадратичного струму

$I_{RMS} = \sqrt{\frac{I_{m1}^2}{2} + \frac{I_{m3}^2}{2} + \frac{I_{m5}^2}{2} + \dots + \frac{I_{mn}^2}{2}}$ показали, що його залежність від приведеного вихідного опору k не перевищує 1 % для будь-яких k . Цей результат можна узагальнити для будь-якого негармонійного сигналу.

Отримані результати показали що перетворювач на базі послідовного резонансного контуру забезпечує стабілізацію діючого значення струму джерела живлення з максимальним відхиленням не більше 1 % при зміні вихідної напруги в досить широкому діапазоні, забезпечуючи при цьому вимоги (1–4) до режимних характеристик високовольтної електророзрядної системи, які необхідні для реалізації електроімпульсного синтезу нановуглецю.

На основі вищесказаного для генерації електричних імпульсів в газі розроблено генератор високовольтних імпульсів напругою до 20 кВ з регульованою частотою від 20 до 100 кГц. Висока напруга необхідна для гарантованого пробую міжелектродного проміжку, а широкий діапазон частот забезпечить управління кількістю залученого в процес синтезу сировини. Для забезпечення широкого діапазону регульованих параметрів генератора розроблені відповідні схемні рішення для кожного режиму роботи і засоби їх перемикавання за допомогою джамперів.

Розробка системи керування режимом газового розряду для підвищення виходу нановуглецю. Синтез відбувається при наявності розрядного проміжку з довжиною від декількох міліметрів до одного дециметра. Розрядний проміжок являє собою найменший газовий проміжок між твердими поверхнями, що мають електричний зв'язок з генератором імпульсів. Такими твердими поверхнями є поверхня електродів і поверхня вуглецевого нагару на електродах. При синтезі нановуглецю розрядний проміжок зменшується за рахунок нарощування нагару на електроді. При повному його заростанні синтез припиняється. Для відновлення генерації імпульсів в газі і, відповідно, синтезу нановуглецю необхідно відновити розрядний проміжок.

Відомо, що вихід нановуглецю майже пропорційно залежить від потужності джерела живлення, тобто від величини струму, що споживається. Відомо [10], що напруга u_c на каналі розряду майже пропорційно залежить від його довжини, тобто і потужність на каналі розряду $p_c = u_c i_c$, також залежить від його довжини. Тому найменше значення струму i , що споживається, буде спостерігатися за умови нульової довжини каналу розряду, а максимальне - за умови такої довжини, при якій характеристики електричної системи є руйнівними для генератора високовольтних імпульсів. Таким чином, для забезпечення найбільшого виходу нановуглецю за умови неруйнівної роботи джерела живлення, необхідно підтримувати значення середньоквадратичного струму, що споживається, в заданому діапазоні $i \in I$ за допомогою системи керування. Очевидно, що розроблювана система повинна забезпечувати автоматичне керування електричними характеристиками газового розряду для

підвищення виходу нановуглецю. Найбільш ефективною в даному випадку є система, оптимальна за швидкістю, тобто така, що забезпечує максимальну швидкість переходу режиму розряду в оптимальний діапазон характеристик високовольтних розрядних імпульсів. Тому розроблено систему автоматичного регулювання за релейним принципом дії з перемикаючою функцією:

$$\Psi = \begin{cases} 1, i \notin I; \\ 0, i \in I. \end{cases}$$

У якості інформаційної координати системи керування режиму розряду, як показано в [11] використовується значення середньоквадратичного струму, що споживається. Структурну схему установки для одержання вуглецевих наноматеріалів із системою керування режиму газового розряду при атмосферному тиску показано на рис. 5. Алгоритм роботи регулятора режиму газового розряду наведено на рис. 6.

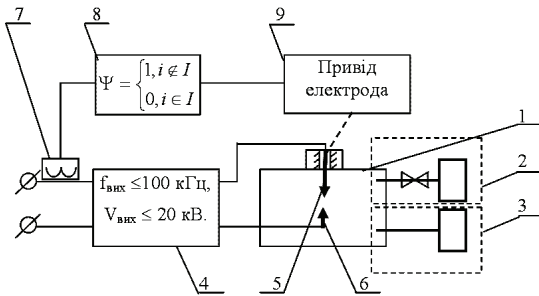


Рисунок 5 – Структурна схема установки для одержання вуглецевих наноматеріалів

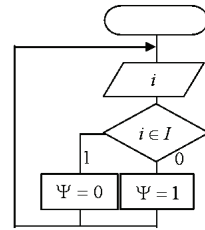


Рисунок 6 – Алгоритм роботи регулятора режиму газового розряду

Установка містить розрядну камеру 1, засоби підведення газової вуглеводневої сировини 2 і відведення продуктів реакції 3, джерело змінного струму 4 з частотою до 100 кГц, рухомий 5 і нерухомий 6 електроди, вихід джерела змінного струму 4 підключеного до електродів 5, 6, розташованих в розрядній камері 1, в проміжку між електродами знаходиться газова вуглеводнева сировина. Установка містить датчик струму 7, регулятор режиму газового розряду 8 і виконавчий механізм 9, який є приводом рухомого електроду, датчик струму 7 встановлено на вході джерела змінного струму 4, його вихід підключено до регулятора режиму газового розряду 8, який підключено до виконавчого механізму 9.

Система керування режимом розряду працює таким чином.

Газову вуглеводневу сировину подають у розрядний проміжок між рухомим 5 і нерухомим 6 електродами за допомогою засобів для підведення сировини 2 у реактор 1. Нерівноважну плазму генерують у каналі газового розряду змінного струму частотою до 100 кГц шляхом з'єднання високовольт-

тного високочастотного джерела змінного струму 4 з електродами 5 і 6. Використовуючи плазму з газової вуглеводневої сировини отримують тепло, необхідне для хімічної реакції розкладання газової вуглеводневої сировини на вуглець і водень та утворення вуглецевих наноструктурних матеріалів. Відводять газоподібні продукти реакції і невикористану сировину за допомогою засобів відведення газоподібних продуктів реакції 3. Розрядний проміжок у процесі одержання нановуглецю постійно зменшується через утворення на кінцях електродів провідного нановуглецевого матеріалу, що призводить до поступового зменшення кількості отриманого нановуглецю і припинення синтезу нановуглецю у разі зменшення довжини дуги до нуля. Впродовж роботи установки (див. рис. 6) за допомогою датчика струму 7 постійно визначаються значення i середньоквадратичного струму, що споживається, і, якщо воно не знаходиться у діапазоні I ($i \notin I$), то вмикається виконавчий механізм 9 (за керуючим сигналом регулятора режиму розряду 8 $\Psi = 1$), який є приводом електроду, і різко переміщує електрод 5 вниз і вгору. В результаті різкого зворотно-поступального руху електрода провідний нановуглецевий матеріал, що утворився на кінцях електродів, руйнується і міжелектродний проміжок знову збільшується, забезпечуючи виконання умови $i \in I$. Після заповнення реактора 1 вуглецевими наноматеріалами, їх висипають з реактора в ємності для зберігання і подальшого використання. Шляхом дії на газову вуглеводневу сировину нерівноважною плазмою каналу електричного розряду забезпечують фізико-хімічні реакції розкладання сировини і створення умов для синтезу вуглецевих наноматеріалів. Для утворення нерівноважної плазми використовують змінний струм частотою до 100 кГц. У якості датчика струму можна використовувати трансформатор струму, у якості регулятора режиму газового розряду можна використовувати регулятор за релейним принципом дії, а у якості виконавчого механізму - електромагніт.

Треба зазначити, що використання системи керування, яка містить датчик струму 7, регулятор режиму розряду 8 і виконавчий механізм 9, дозволяє підтримувати довжину каналу газового розряду в заданому діапазоні, що забезпечить отримання достатньої кількості плазми для утворення вуглецевих наноструктурних матеріалів, а також отримувати електродинамічні і термодинамічні характеристики нерівноважної плазми, необхідні для створення вуглецевих матеріалів заданої наноструктури з малим статистичним розсіянням їх властивостей і за рахунок цього суттєво збільшити продуктивність і зменшити собівартість отримання наноматеріалів, підвищити вихід вуглецевих наноматеріалів.

Для синтезу нановуглецю розроблено і виготовлено два реактори з електродними системами, забезпеченими електромагнітним приводом (рис. 7), і система керування приводом.

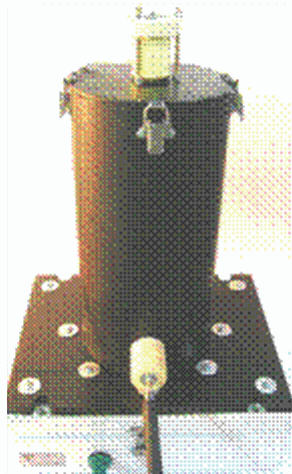


Рисунок 7 – Реактор з електродними системами, забезпеченими електромагнітним приводом

Розробка системи керування, яка забезпечує керування роботою установки, індикацію режимів роботи і захист в аварійних ситуаціях. Для надійної та безпечної роботи високовольтного обладнання розроблено систему керування високовольтною установкою, яка має ієрархічну структуру (рис. 8). Верхнім рівнем системи керування є супервайзер, який керує підключенням локальних систем керування – системою керування режимом розряду, системою керування генератором високовольтних імпульсів, системою керування витратою газової сировини і забезпечує зв'язок з диспетчером. Крім того супервайзер виконує функції попереднього налаштування і індикації режимів роботи, відображення поточного стану операцій і аварійного відключення установки у разі надходження сигналів тривоги від локальних систем керування. Нижній рівень системи керування містить датчики і індикатори. Датчик струму, що споживається, датчик температури реактора і індикатори є колективними ресурсами, тобто використовуються всіма локальними системами, тому в системі реалізовано шинний інтерфейс. Інформаційною координатою вектора стану робочого середовища в реакторі обрана температура і її зміна. Момент закінчення поточної операції (режиму генерації високовольтних імпульсів і, відповідно, синтезу нановуглецю) визначається в режимі реального часу при досягненні заданого значення температури на поверхні реактора.

Відповідно до наведених вище принципів за результатами виконаних розробок було виготовлено високовольтну установку з системою керування електричними характеристиками газового розряду для синтезу нановуглецю з onion-like структурою.



Рисунок 8 – Система керування високовольтною установкою

Випробування розробленої установки показало відповідність її характеристик до розрахунків:

- максимальна потужність – 1 кВт;
- максимальна вихідна напруга – 20 кВ;
- діапазон налаштування частоти – від 20 до 100 кГц;
- маса установки – до 50 кг;
- максимальна продуктивність – 20 г/год.

При потужності генератора 1 кВт продуктивність установки при безперервній роботі досягає 20 г нановуглецю за годину. Синтезований аморфний нановуглець має onion-like структуру з розміром частинок в діапазоні від 8 до 30 нм. Він не містить домішок і не потребує додаткового доочищення (вміст вуглецю від 99 до 99,99%).

Висновки. Розроблено базове технологічне рішення для реалізації електророзрядного високочастотного способу синтезу аморфного нановуглецю з onion-like структурою і виготовлено експериментальну високовольтну установку. Електрофізичні характеристики технологічного контуру розробленої високовольтної системи дозволяють отримати хімічно чистий нановуглець (від 99 до 99,99 %) з вузьким розподілом розміру частинок нановуглецю в межах від 8 до 30 нм.

На основі аналізу умов, необхідних для синтезу нановуглецю, розроблено генератор високовольтних імпульсів, який дозволяє отримувати необхідний широкий діапазон електричних характеристик розрядних імпульсів. Об-

грунтовано використання оптимальної системи керування електричними характеристиками газового розряду. Систему керування установки виконано на базі сучасних цифрових технологій, що забезпечує виконання складних багаторівневих задач керування технологічним процесом.

Наведені теоретичні положення використані при розробці високовольтної установки для синтезу нановуглецю з onion-like структурою. Розроблена установка дозволяє підвищити продуктивність отримання чистого нановуглецю до 20 г за годину за рахунок використання системи регулювання електричних характеристик газового розряду.

Список літератури. 1. *Guang Feng, Deen Jiang, Peter T. Cummings* Curvature Effect on the Capacitance of Electric Double Layers at Ionic Liquid / Onion-Like Carbon Interfaces // *J. Chem. Theory Comput.* – 2012. – 8 (3). – P. 1058-1063. 2. *Song Li, Guang Feng, Pasquale F. Fulvio, Patrick, C. Hillesheim, Chen Liao, Sheng Dai, Peter T. Cummings* Molecular Dynamics Simulation Study of the Capacitive Performance of a Binary Mixture of Ionic Liquids near an Onion-like Carbon Electrode // *The Journal of Physical Chemistry Letters.* – 2012. – 3 (17). – P. 2465-2469. 3. *Amanda Barnard* Mapping the location and configuration of nitrogen in diamond nanoparticles // *The Journal of Physical Chemistry Letters.* – 2012. – 4 (18). – P. 245-249. 4. *John K. McDonough and Yury Gogotsi* Carbon Onions: Synthesis and Electrochemical Applications // *The Electrochemical Society Interface.* – 2013. – P. 61-66. 5. *Осипова И.В.* Никельсодержащие углеродные нанотрубки и наночастицы, полученные в плазме высокочастотной дуги / *И.В.Осипова, Н.Г. Внукова, Г.А. Глуценко, А.С. Крылов, Е.В. Томашевич, С.М. Жарков, Г.Н. Чурилов* // *Физика твердого тела.* – 2009. – Т. 51, вып. 9. – С. 1857-1859. 6. *Веремій Ю.П.* Утворення вуглецевих наноматеріалів в плазмі вторинного розряду / *Ю.П. Веремій, В.Я. Черняк, С.А. Філатов* // *Укр. фіз. журн.* – 2008. – Т. 53, № 4. – С. 395-399. 7. Пат. 95543 Україна МПК C01B 31/02 (2006.01), H05H 1/24 (2006.01), H05H 1/32 (2006.01). Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів (варіанти) / *Л.З.Богуславський, Д.В.Винниченко, Н.С.Назарова* (Україна); заявник і патентовласник ІППТ НАН України. – № а 2010 01186; заявл. 05.02.2010; Опубл. 10.08.2011 р., Бюл. № 15. – 9 с. 8. *Рудь А.Д.* Исследование структуры УНМ, полученных методами электроразрядной обработки углеродсодержащих газов / *А.Д. Рудь, И.М. Кирьян, Л.З. Богуславский, Г.М. Зелинская, Н.С. Назарова, Д.В. Винниченко* // *Металлофизика, новейшие технологии.* – 2011. – Т. 33, спецвыпуск. – С.111-115. 9. *Boguslavskii L.Z.* Electrodischarge Method for Synthesizing Nanocarbon from Gaseous Raw Hydrocarbons / *L. Z. Boguslavskii, N. S. Nazarova, D. V. Vinnichenko, A. D. Rud, I. V. Urubkov* // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* – 2011. – Vol. 47, No 4. – P. 352-358. 10. *Винниченко Д.В.* Визначення оптимальних характеристик високовольтної електророзрядної системи для реалізації технології електроімпульсного синтезу нановуглецю // *Технічна електродинаміка.* – 2014. – № 4. – С. 129-131. 11. *Щерба А.А., Винниченко Д.В.* Стабілізація та регулювання режимних параметрів високовольтної електророзрядної системи для електроімпульсного синтезу нановуглецю // *Вісник НТУ «ХП».* – 2014. – № 21 (1064). – С.141-151.

Bibliography (transliterated): 1. *Guang Feng, De-en Jiang, Peter T. Cummings* Curvature Effect on the Capacitance of Electric Double Layers at Ionic Liquid Onion-Like Carbon Interfaces. *J. Chem. Theory Comput.* 2012. 8 (3). 1058-1063 Print. 2. *Song Li, Guang Feng, Pasquale F. Fulvio, Patrick, C. Hillesheim, Chen Liao, ShengDai, Peter T. Cummings* Molecular Dynamics Simulation Study of the Capacitive Performance of a Binary Mixture of Ionic Liquids near an Onion-like Carbon Electrode. *The Journal of Physical Chemistry Letters.* 2012. 3 (17). 2465-2469 Print. 3. *Amanda Barnard.* Mapping the location and configuration of nitrogen in diamond nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry Letters.* 2012. 4 (18). 245-249 Print.. 4. *John K. McDonough, Yury Gogotsi* Carbon Onions: Synthesis and Electrochemical Applications. *The Electrochemical Society Interface.* 2013. 61-66 Print. 5. *Osipova I.V.* Nikelsoderzhaschie uglerodnyie nanotrubki i nanochastitsyi, poluchennyye v plazme vysokochastotnoy dugi. *I.V.Osipova, N.G. Vnuкова, G.A. Gluschenko, A.S. Krylov, E.V. Tomashevich, S.M.*

Zharkov, G.N. Churilov. Fizika tverdogo tela. 2009. Vol. 51.9. 1857-1859 Print. **6.** Veremly Yu.P. Utvorennaya vugletsevih nanomaterialiv v plazmi vtorinnogo rozryadu. Yu.P. Veremly, V.Ya. Chernyak, S.A. Filatov Ukr. flz. zhurn. – 2008. Vol. 53.4. 395-399 Print. **7.** Pat. 95543 Ukraine MPK C01V 31/02 (2006.01), H05H 1/24 (2006.01), H05H 1/32 (2006.01). Sposib oderzhannya vugletsevyh nanomaterialiv (varianti). L.Z.Boguslavskiy, D.V.Vinnichenko, N.S.Nazarova; zayavnik i patentovlasnik IPT NAN UkraYini. No a 2010 01186; zayavl. 05.02.2010; Opubl. 10.08.2011 r., Byul. No 15. 9 Print. **8.** Rud A.D. Issledovanie strukturyi UNM, poluchennyh metodami elektrorozryadnoy obrabotki ugleterosoderzhaschih gazov. A.D. Rud, I.M. Kiryan, L.Z. Boguslavskiy, G.M. Zelinskaya, N.S. Nazarova, D.V. Vinnichenko. Metallofizika, noveyshie tehnologii. 2011. Vol. 33. spetsvyipusk. 111-115 Print. **9.** Boguslavskii L.Z. Electrodischarge Method for Synthesizing Nanocarbon from Gaseous Raw Hydrocarbons L. Z. Boguslavskii, N. S. Nazarovaa, D. V. Vinnichenko, A. D. Rud and I. V. Urubkov. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2011. Vol. 47.4. 352–358 Print. **10.** Vinnychenko D.V. Vyznachennya optymal'nykh kharakterystyk vysokovol'tnoyi elektrorozryadnoyi systemy dlya realizatsiyi tekhnolohiyi elektroimpul'snoho syntezy nanovuhletsyu. Tekhnichna elektrodynamika. 2014. No 4. 129-131 Print. **11.** Shcherba A.A., Vinnychenko D.V. Stabilizatsiya ta rehulyuvannya rez-hymnykh parametriv vysokovol'tnoyi elektrorozryadnoyi systemy dlya elektroimpul'snoho syntezy nanovuhletsyu. Visnyk NTU «KhPI». 2014. No 21 (1064). 141-151 Print.

Надійшла (received) 19.03.2015

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

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

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

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

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

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ

Разработан алгоритм адаптивного управления импульсным источником питания системы электрофильтрации, обеспечивающий корректировку параметров импульсов в соответствии с текущим составом экологически опасных промышленных газовых выбросов. Определены информационные координаты и каналы управляющих воздействий. Данный алгоритм дает возможность генерировать высоковольтные импульсы с параметрами, позволяющими вести эффективную деструкцию всех весомых составляющих в процессе обработки.

© Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, Л. Е. Овчинникова, С. С. Козырев, 2015

Ключевые слова: адаптивное управление, алгоритм, импульсные источники питания, электрофильтрация, экологически опасные промышленные выбросы.

Введение. В системах электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов для осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции их экологически опасных составляющих используются дополнительные импульсные высоковольтные высокочастотные источники питания, формирующие импульсы напряжения специальной формы [1]. Наличие в промышленных выбросах различных опасных составляющих и пылевых частиц с разным сопротивлением, а также текущее изменение их соотношения в процессе очистки, обуславливает необходимость корректировки параметров импульсов дополнительных импульсных высокочастотных источников питания в соответствии с текущим составом и весовыми долями промышленных выбросов. Это требует разработки адаптивных алгоритмов управления импульсными высокочастотными источниками питания систем электрофильтрации.

Целью работы является исследование экологически опасных промышленных выбросов как объекта обработки и импульсных высоковольтных высокочастотных источников питания как объекта управления с целью определения координат вектора состояния, выбора информационных входных координат, каналов управляющих воздействий для разработки адаптивных алгоритмов управления, позволяющих варьировать параметры импульсов в процессе осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных составляющих в зависимости от текущего состава и весовых долей промышленных выбросов.

Материалы исследований. Предварительные исследования экологически опасных промышленных выбросов показали, что в их состав входят разноимпедансные пылевые частицы; соединения углерода CO_x , серы SO_x и азота NO_x ; высокомолекулярные канцерогенные соединения. Для осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных составляющих необходимы высоковольтные импульсы напряжения специальной формы с различными параметрами [2].

С целью обеспечения эффективного осаждения пыли при электрофильтрации используют ее дозарядку высоковольтными импульсами напряжением $(30-100)\% U_{инп}$, длительность которых (обычно это десятки-сотни микросекунд) должна соответствовать электрическим параметрам пыли. Частота следования разрядных импульсов в зависимости от удельного электрического сопротивления пыли должна находиться в диапазоне $10...1000$ Гц - это условие обеспечения стабильного разряда при изменении характеристик среды в процессе работы импульсных источников питания в значительном объеме обрабатываемых выбросов. Таким образом, в зависимости от текущего со-

става пыли возникает необходимость регулировки амплитуды, длительности и частоты следования импульсов в процессе обработки для эффективного осаждения разноимпедансных составляющих.

Для деструкции экологически опасных составляющих необходимо обеспечить плазмохимическое преобразование окислов углерода CO_x , серы SO_x и азота NO_x в сравнительно безопасные соединения, а также осуществить плазмохимическое преобразование высокомолекулярных канцерогенных соединений в простые, безопасные соединения. Как показали предварительные экспериментальные исследования, деструкция возможна при создании неравномерного электрического поля напряженностью не менее 2 МВ/м в точках образования стримера, что технически можно реализовать формированием стримерного объемного разряда в газовой среде. Для формирования такого разряда при атмосферном давлении без предварительной ионизации необходимы высоковольтные высокочастотные импульсы с наносекундным фронтом, амплитудой от 60 до 120 кВ, длительностью от 50 до 100 мкс, с частотой следования от 1 до 10 кГц в зависимости от состава газовых выбросов [3]. Таким образом, обеспечение результативной деструкции экологически опасных составляющих газовых выбросов требует изменения параметров импульсов, генерируемых импульсным высоковольтным источником питания, в соответствии с их текущим составом.

В результате проведенных исследований объекта обработки - экологически опасных промышленных выбросов в электрофильтре установлено, что в процессе фильтрации изменяется их количественный и качественный состав и для обеспечения эффективного осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных составляющих необходимо обеспечить текущий контроль состава выбросов с целью корректировки параметров импульсов, генерируемых импульсным высоковольтным источником питания.

Обеспечение операционного контроля состава газовых выбросов потребовало проведения анализа существующих газовых анализаторов. В качестве датчика газового анализатора для определения состава газовых выбросов может быть выбран первичный электрохимический преобразователь (ПЭП) для преобразования массовой концентрации газовой составляющей в токовый сигнал, пропорциональный концентрации. А для определения массовой концентрации различных взвешенных пылевых частиц в газоанализаторе можно использовать измеритель оптической плотности пылегазовой среды ВГО-2 [4]. Применение газоанализаторов позволяет проводить непосредственный текущий анализ структуры конкретной газовой смеси и определять в объеме опасных выбросов количество и весовой коэффициент наиболее значимых составляющих газовых выбросов, что может использоваться в качестве информационных координат в системе управления.

Комплексные системы электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов обеспечивают эффективное осаждение высокоомных

пылей и деструкцию экологически опасных газовых выбросов с помощью дополнительных управляемых импульсных источников питания, генерирующих высоковольтные высокочастотные импульсы, количество и параметры которых должны соответствовать количеству и величине долей весомых составляющих промышленных выбросов. Для обеспечения такого соответствия необходима разработка адаптивных алгоритмов управления импульсными источниками питания.

С целью разработки адаптивных алгоритмов управления проведено исследование импульсного высоковольтного высокочастотного источника питания как объекта управления для выбора каналов управляющих воздействий и информационно эффективных координат контроля. В системах электрофильтрации в качестве дополнительного импульсного источника питания используются генераторы высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом для получения стримерного коронного разряда [5].

Необходимое количество генераторов ($\Gamma_1 \dots \Gamma_N$) в источнике питания равняется количеству весомых составляющих фильтруемых промышленных выбросов и определяется по результатам предварительного анализа их состава [6].

В результате проведенных исследований установлены информационно эффективные и аппаратно определяемые выходные координаты генератора высоковольтных импульсов: амплитуда импульса, длительность импульса, крутизна фронта импульса, частота следования импульсов. Каналами управляющих воздействий генератора высоковольтных импульсов являются входы регулятора напряжения и формирователя импульсов.

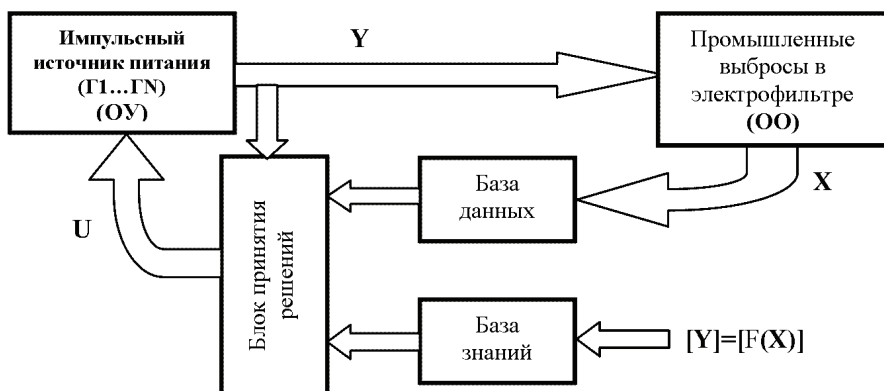


Рисунок 1 – Блок-схема адаптивной системы управления процессом очистки газовых выбросов: X – вектор состояния объекта обработки (ОО); Y – выходной вектор объекта управления (ОУ); U – вектор управляющих воздействий; $[Y]=[F(X)]$ – множество законов управления

На основании исследования объекта обработки ОО (экологически опасные промышленные выбросы в электрофильтре) и объекта управления ОУ (генераторы высоковольтных импульсов Г1...ГN) построена обобщенная блок-схема адаптивной системы управления процессом очистки промышленных выбросов (рис. 1).

Координатами вектора состояния объекта обработки X являются сигналы с газоанализатора, соответствующие весовым коэффициентам наиболее значимых составляющих промышленных выбросов. Координатами выходного вектора объекта управления Y являются параметры импульсов на выходе генератора (амплитуда импульса, длительность импульса, крутизна фронта импульса, частота следования импульсов). Координатами вектора управляющих воздействий U являются сигналы, поступающие на регулятор напряжения и формирователь импульсов генератора с системы управления по алгоритму, выработанному в блоке принятия решений в соответствии с текущими значениями координат вектора состояния объекта обработки, выходного вектора объекта управления и множеством законов управления, заложенных в базу знаний.

Для формирования базы знаний необходимо проведение серии экспериментов на созданных макетных образцах высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов [7] или на реальных установках электрофильтрации, что позволит получить множество законов управления в виде однозначного соответствия $[Y]=F(X)$. Результаты экспериментальных исследований дадут возможность установить необходимые значения параметров импульсов, генерируемых импульсными высоковольтными высокочастотными источниками питания, для осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных газовых выбросов при различных сочетаниях составных элементов и их весовых долей.

На основании анализа проведенных исследований синтезирован адаптивный алгоритм управления импульсными высокочастотными источниками питания систем электрофильтрации (рис. 2).

Реализовать синтезированный алгоритм возможно на промышленных контроллерах фирмы Atmel серии Mega (AtMega16, AtMega8535) или на контроллерах STM 32 с ядром ARM, которые обеспечивают необходимое быстроедействие управления элементами системы и имеют полный набор используемых функций, дополнительные подсистемы индикации и панели ввода информации.

При обеспечении возможности изменения базы знаний алгоритм является универсальным и позволяет осуществлять адаптивное управление импульсными высоковольтными высокочастотными источниками питания комплексных систем электрофильтрации, гарантируя эффективную деструкцию всех весовых составляющих разноимпедансных газовых выбросов при минимальных энергозатратах.

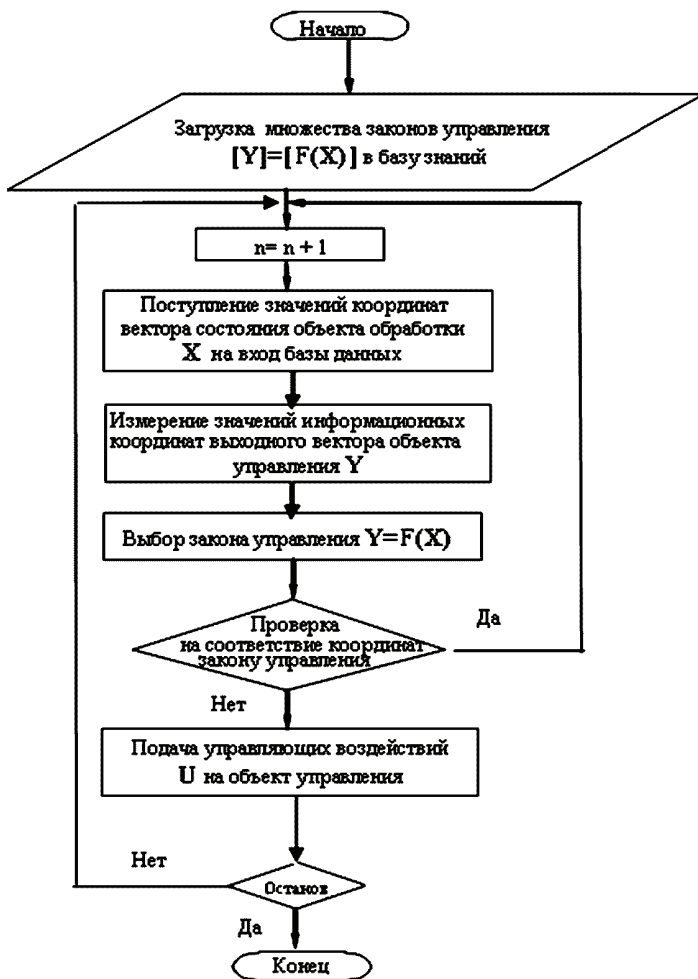


Рисунок 2 – Адаптивный алгоритм управления

Выводы. Проведены исследования экологически опасных промышленных выбросов как объекта обработки и импульсного высоковольтного высокочастотного источника питания как объекта управления, состоящего из N генераторов высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом, на основании которых определены информационные координаты и каналы управляющих воздействий системы адаптивного управления. База знаний должна быть сформирована по результатам экспериментальных исследований на созданных макетных образцах высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации. Для получения множества законов управления

необходимо установить значения параметров импульсов, генерируемых импульсными высоковольтными высокочастотными источниками питания, необходимые для осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных составляющих промышленных выбросов, при различных сочетаниях составных элементов и их весовых долей, что является основой для синтеза адаптивного алгоритма управления и формирования базы знаний.

В результате проведенных исследований построена архитектура адаптивной системы управления и разработан адаптивный алгоритм управления импульсным источником питания системы электрофильтрации, обеспечивающей корректировку параметров импульсов генераторов в соответствии с текущим составом промышленных выбросов, что дает возможность генерировать высоковольтные импульсы с параметрами, позволяющими вести эффективную деструкцию всех весомых составляющих в процессе обработки экологически опасных промышленных выбросов при минимальных энергозатратах.

Список литературы. 1. Пат. 90293 Україна, МПК (2014) B01D 53/32 (2006.01) C10K 1/00 Н1Т 19/00. Спосіб деструкції різноімпедансних газових викидів небезпечних промислових об'єктів / *Богуславський Л. З., Мирошніченко Л. М., Діордійчук В. В.*; заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № у 2013 11731; заявл. 04.10.2013; опубл. 26.05.14. Бюл. № 10. **2.** *Богуславський Л. З.* Электрофильтрация разноимпедансных газовых выбросов в комплексной системе пылегазоочистки экологически опасных промышленных объектов / *Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошніченко* // Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – № 21. – С. 12-16. **3.** *Богуславський Л. З.* Влияние режимов работы высоковольтного источника питания на формирование стримерного коронного разряда и эффективность систем газоочистки / *Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошніченко, Ю. Г. Казарян, Н. С. Ярошинский* // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2011. – Ч. 1. – С. 44-49. **4.** http://www.ukranalyt.com.ua/index4_0.htm Газоаналитические приборы, ЗАО «Укрналит». **5.** Пат. 50169 Україна, МПК H03K 3/53 (2006.01) Генератор високовольтних імпульсів з наносекундним фронтом для отримання стримерного коронного розряду / *Богуславський Л. З., Мирошніченко Л. М., Казарян Ю. Г., Христо О. І.*; заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № у 2009 12959; заявл. 14.12.2009; опубл. 25.05.10. – Бюл. № 10. **6.** Заявка № у 2014 07889 Україна, МПК (2014.01) H03K3/53 B01D 53/32 C10K1/00 Система імпульсного електроживлення електрофільтрів для очищення різноімпедансних газових викидів / *Богуславський Л. З., Мирошніченко Л. М., Овчиннікова Л. Є.* Заявлено 14.07.2014. **7.** *Богуславський Л. З.* Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов / *Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошніченко, В. В. Диордійчук, Д. В. Винниченко, Н. С. Ярошинский* // Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – № 52 (958). – С. 31-39.

Bibliography (transliterated): 1. Pat. 90293 Ukraine, MPK (2014) B01D 53/32 (2006.01) C10K 1/00 H1T 19/00. Sposib destruktivnoyi riznoimpedansnykh hazovykh vykydiv nebezpechnykh promyslovykh ob'yektiv Bohuslavskyy L. Z., Myroshnychenko L. M., Diordiychuk V. V.; zayavnyk ta patentovlasnyk Instytut impul'nykh protsesiv i tekhnolohiy NAN Ukrainy. № u 2013 11731; zayavl. 04.10.2013; opubl. 26.05.14. Byul. No 10. Print. **2.** Bohuslavskyy L. Z. Elektrofiltratsiya raznoympedansnykh hazovykh vybrosov v kompleksnoy systeme pyl'egazoochystky ekologicheskyy opasnykh promyshlennykh ob'yektiv L. Z. Bohuslavskyy, L. N. Myroshnychenko Vestn. Har'k. politehn. in-

ta. No 21. 2014. 12-16 Print. 3. Boguslavskij, L. Z. Vlijanie rezhimov raboty vysokovoltnogo istochnika pitaniya na formirovanie strimernogo koronnogo razrjada i effektivnost sistem gazoochistki L. Z. Boguslavskij, L. N. Myroshnychenko, Yu. G. Kazaryan, N. S. Yaroshynskij Tehn. elektrodinamika. Tem. vyp. Sylova elektronika ta energotfektyvnist. 2011. 44-49. Print. 4. http://www.ukranalyt.com.ua/index4_0.htm Gazoanaliticheskie priboryi, ZAO «Ukranalit» Web. 5. Pat. 50169 Ukraine, MPK H03K 3/53 (2006.01) Generator vysokovoltnykh impulsiv z nanosekundnym frontom dlya otrymannya strypernogo koronnogo rozryadu Boguslavskij L. Z., Myroshnychenko L. M., Kazaryan Yu. G., Xrysto O. I.; zayavnyk ta patentovlasnyk Instytut impulsnykh procesiv i tehnologij NAN Ukraine. № u 2009 12959; zayavl. 14.12.2009; opubl. 25.05.10. Byul. No 10. Print. 6. Zayavka № u 2014 07889 Ukraine, MPK (2014.01) H03K3/53 B01D 53/32 C10K1/00 Systema impulsnoho elektrozhvylennyia elektrofiltriv dlya ochyshchennya riznoimpedansnykh hazovykh vykydiv Bohuslavskyy L. Z., Myroshnychenko L. M., Ovchynnikova L. Ye. Zayavleno 14.07.2014. Print. 7. Boguslavskij, L. Z. Sozdanie maketnyh obrazcov vysokovoltnogo oborudovaniya kompleksnyh sistem elektrofiltracii ekologicheski opasnyh promyshlennyh vybrosov L. Z. Boguslavskij, L. N. Myroshnychenko, V. V. Dyordyjchuk, D. V. Vynnychenko, N. S. Yaroshynskij. Vestn. Har'k. politehn. in-ta. No 52 (958). 2012. 31-39. Print.

Поступила (received) 14.04.2015

УДК 681.84.087.47 : 621.391

А. О. ДОВЖЕНКО, аспірант, НТУУ «КПІ», Київ;
В.Б. ШВАЙЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУУ «КПІ», Київ;
О. ШАРАДГА, аспірант, НТУУ «КПІ», Київ

ОСОБЛИВОСТИ МЕТОДУ УЩІЛЬНЕННЯ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ЗВУКОВОГО КОНТЕНТУ

Визначено особливості методів передискретизації в цифровій обробці багатоканальних форматів для покращення електромагнітної сумісності (ЕМС) цифрових звукотехнічних систем. Досліджено ефективність каналного мультиплексування під час передискретизації за умови застосування дельта-сігма модуляції. Проведено порівняння особливостей сучасних аудіоформатів за критеріями ЕМС. Оцінено перспективи та визначені переваги пропонованого методу ущільнення спектральних складників прямого цифрового потоку.

Ключові слова: багатоканальні аудіоформати, електромагнітна сумісність, обробка сигналів, спектральні характеристики, цифрові звукотехнічні системи.

Вступ. В нинішній час потреби якості запису та відтворення звукової інформації постійно підвищуються. Користувачі потребують більш якісного звуку у кінотеатрах та домашніх звукових системах. Збільшують частотний діапазон, кількість каналів, оптимізують програмні та апаратні засоби коду-

© А. О. Довженко, В. Б. Швайченко, О. Шарадга, 2015

вання та декодування. Але апаратна реалізація досить часто відрізняється. Тому існує потреба в універсальному форматі, що зможе забезпечувати якісний звук та можливість масштабування, з необхідною локалізацією максимумів спектральних складників за вимогами електромагнітної сумісності (ЕМС).

Актуальність. Сучасні аудіосистеми багатоканального запису та відтворення використовують різні формати, для різних задач. Відомі багатоканальні системи [1], в яких спочатку проводять мультиплексування каналів, а потім пере дискретизацію з метою зменшення шумів квантування в низько-частотній області. Це призводить до потреби універсальних потужних блоків обробки звукових даних [2]. Однак робота ключових елементів електричних блоків звукотехнічних систем на підвищеній до сотень кілогерц частотах є причиною збільшення кондуктивних радіозавад [3]. Тому дослідження особливостей кодування цифрових відліків багатоканальних аудіоформатів за вимогами ЕМС та аналіз можливостей їх удосконалення за цим критерієм є актуальним.

Постановка задачі. Для вибору методу, найбільш придатного для проведення маніпуляцій з спектральними максимумами, необхідно порівняти переваги кожного з методів кодування багатоканального звуку. Окрім того, необхідно визначити особливості формування багатоканальний сигналів за новою процедурою, спочатку провівши аналогово-цифрове перетворення сигналів усіх каналів, а потім виконавши як мультиплексування, так і передискретизацію з аналізом спектральних характеристик цифрового потоку сигналів прототипу і аналізуємих за новими процедурами.

Проведемо аналіз сучасних форматів для визначення їх основних переваг та недоліків в аспекті ЕМС. Одним з прогресивних сучасних форматів є Super Audio CD (SACD) [1]. Даний стандарт передбачає від 1 до 6 звукових каналів. Результати порівняння цього формату з іншими сучасними форматами [2,4] для якісного запису/відтворення звуку наведено в табл. 1.

Формати CD, DVD-Audio та SACD передбачають фіксовану кількість каналів для запису. FLAC (Free Lossless Audio Codec) [4,5] передбачає від 1 до 8 каналів в залежності від потреби. Також FLAC [6,7] забезпечує стиснення даних без втрат при відтворенні.

Особливістю SACD є використання DSD (англ. Direct Stream Digital) [1] – однобітний аудіоформат, розроблений компаніями Sony і Philips, в якому використовують кодування широтно-щільнісною модуляцією (англ. Pulse Density Modulation (PDM), різновид сигма-дельта-модуляції) і застосовують для зберігання звукозаписів на оптичному носії SACD. Спочатку розроблявся як формат архівування звукозаписної компанії Sony Music для музичного архіву у цифровий формат.

Зазвичай, при записі та відтворенні багатоканального звуку не достатньо

фіксованої кількості каналів. При багатоканальному записі, наприклад концерту, існують потреби в записі окремо кожного інструменту чи групи інструментів одним загальним елементом для часової синхронізації. Кількість інструментів чи груп змінюється, а отже і кількість каналів. Збільшувати кількість каналів до нескінченності не раціонально.

Цю проблему можна вирішити, запропонувавши новий формат, що забезпечує однобітне подання з використанням перемешовування різних каналів.

Таблиця 1 – Популярні аудіо формати

	CD	DVD-Audio	SACD	Flac [7]
Формат, біт	16	16-, 20-, 24	1	8, 12, 16, 20, 24
Частота дискретизації, кГц	44,1	44,1—192	2822,4	8-96
Динамічний діапазон, дБ	96	144 (теоретично)	120	96
Частотний діапазон, Гц	20-20 000	до 96000	20-50 000	20-20 000
Ємність диску, ГБ	0,7	4,7—8,5	4,7-8,5	
Час на одному носії, хв.	80		>180 / 109	-
Сtereo	+	+	+	+
Surround Sound	-	5.1 (крім 192 кГц)	5.1	8

Спочатку для кожного каналу виконують однорозрядне квантування до передискретизації. Аналоговий звуковий сигнал конвертується в цифровий за допомогою дельта-сигма модуляції при частоті дискретизації, але з рівнем всього 1 біт.

Надлишковість має велике значення при усуненні шумів квантування [4]. Оскільки сигнал передискретизовано, сусідні відліки корелюють один з одним. У підсумку так званого «мережевого ефекту» потужність шуму в частотному діапазоні, займаному корисним сигналом, зменшується пропорційно підвищенню частоти дискретизації. Передискретизація дозволяє уникнути необхідності попереднього фільтрування і зберігає гармоніки в їх первинному стані (хоча вони можуть виявитися задавленими шумом квантування, особливо на високих частотах). Фазова характеристика стає більш схожою з характеристиками високочастотних аналогових систем.

Основними перевагами порівняно з імпульсно-кодовою модуляцією PCM (англ. Pulse Code Modulation, див. рис. 1) є:

- частотний та динамічний діапазони є ширшим у порівнянні з аудіо-форматами Flac та CD;
- завадостійкість є вищою у порівнянні з пакетною обробкою кожного каналу, оскільки при втраті пакету втрачається ця частина запису (а в даній реалізації – відповідно, менша частина);
- простіша апаратно-програмна обробка багатоканальних реалізацій

порівняно з обробкою окремих доріжок;

- зниження впливу пакетних помилок.

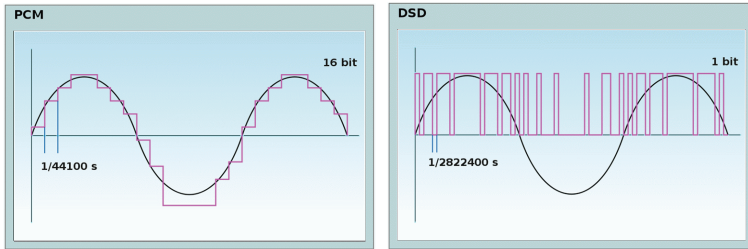


Рисунок 1 – Формування тонального сигналу кодами PCM та DSD

Наведемо параметри модельного сигналу (рис. 2) та його спектри за умов:

- частота дискретизації 44,1 кГц;
- розрядність 32 біти;
- інформаційна швидкість 176 400 біт/с;
- граничне значення динамічного діапазону 192 дБ.

Формат файлу WAV (Waveform Audio File Format). Це музикальний запис тривалістю 10 с групи Eagles – Dust in the wind, у котрого гучніші низькі частоти та тихші високі.

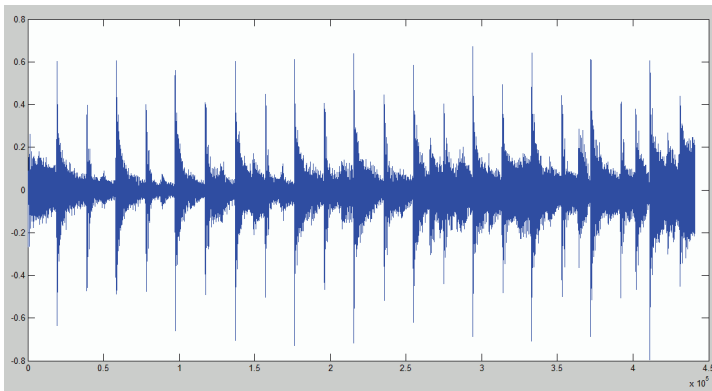


Рисунок 2 – Звуковий сигнал одного каналу в часовій області

Порівняємо спектри послідовного запису кожного каналу та передискретизованого (паралельного записів). При послідовному записі до спільної доріжки записують один за одним від початку до кінця кожен звуковий доріжку. Таким чином окремі доріжки розміщені у спільному файлі. При передискретизації послідовно записують блоки кожної з доріжок до

одної спільної. Тобто спочатку перший біт першої каналу, далі перший біт другого і так всі канали. Далі операція повторюють з наступними бітами до закінчення. Відповідно частота такого потоку буде більша на кратну кількість каналів від частоти дискретизації.

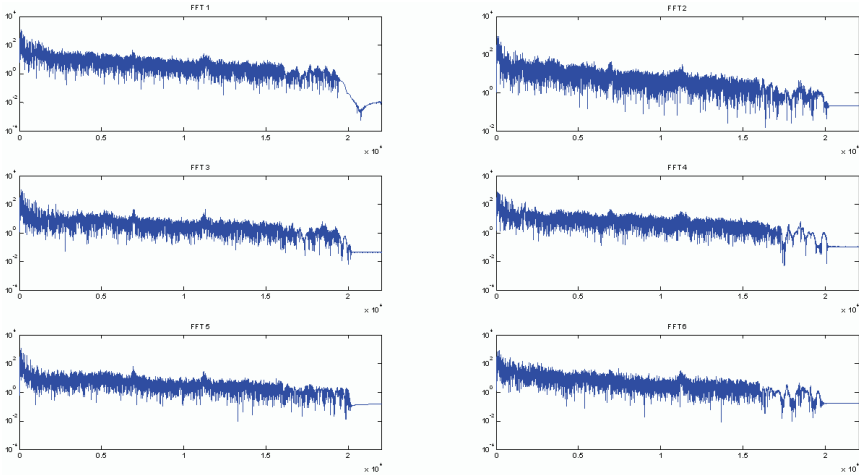


Рисунок 3 – Спектр кожного з 6 каналів

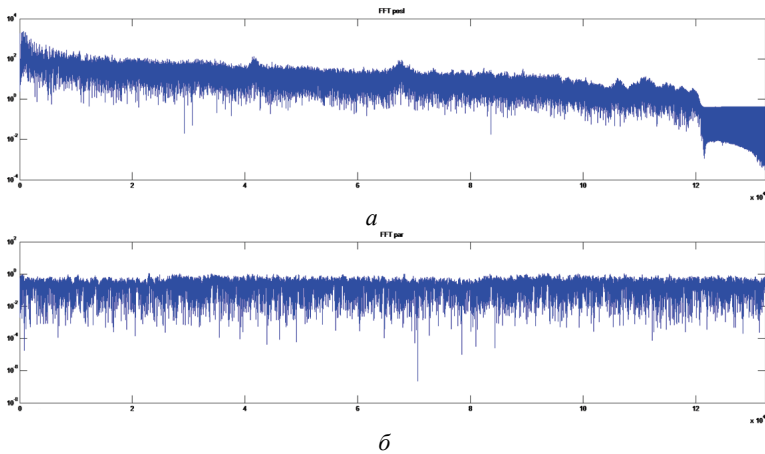


Рисунок 4 – Спектр сигналів: *a* – мультимплексованого; *б* – передискретизованого

Спектри представлено на рис. 4. Типова процедура передискретизації полягає в збільшенні частоти шляхом повторення бітів кожної низькочастотної вибірки в коефіцієнт трансформатції разів на періоді. Удосконалення процедури полягає в ущільненні інформації таким чином, що спочатку пер-

ший біт першого каналу, далі перший біт другого і так всі канали. Далі операція повторюють з наступними бітами до закінчення фрагменту.

Аналіз спектрів за рис. 3 дозволяє зробити висновок, що вони схожі. Спектр мультиплексованого сигналу подібен до спектру сигналів, розміщених у ньому, оскільки складений мультиплікативно. Але спектр сигналу з удосконаленою передискретизацією не подібен до початкових. У передискретизованого сигналу спектр рівномірно розподілений, на відміну від спектру мультиплексованих сигналів. Це зумовлено вибірковою подібністю сигналів, оскільки кожен сигнал розділено на блоки.

Моделювання проведено в середовищі Matlab. Послідовність програми є наступною: зчитування файлів за зазначених умов до масивів; побудова одного з монофонічних фонограм; ШПФ кожного сигналу та їх побудова; створення послідовного файлу шляхом послідовного поєднання масивів сигналів за допомогою команді cat; поєднання монофонічних сигналів до одного масиву та його транспонування; ШПФ матриці передискретизованого сигналу; побудова спектрів послідовного та передискретизованого сигналів.

Висновки. Отже, поєднавши переваги SACD та масштабування, можна отримати шуканий формат з необхідною локалізацією максимуму спектральних характеристик. Результатом цього поєднання будуть наступні переваги:

- однопоточність даних при обробці, що полегшує апаратну та програмні реалізації та дозволяє забезпечити вимоги EMC;
- динамічний діапазон щонайменше у 120 дБ;
- частотний діапазон не менше 20-50 000 Гц;
- можливість створення файлів різних розмірів (відсутність обмеженості диску, наприклад, як у формату SuperCD);
- масштабування кількості каналів (від моно до багатоканального) за потреб запису без надлишковості;
- можливість ефективного програмного виділення кожного каналу для зменшення навантаження на всю систему обробки;
- можливість долучення каналів в існуючий запис додаванням нової доріжки, а не переписуванням та перемережуванням всіх доріжок;
- єдиний стандарт для апаратної та програмної реалізації (можливість кодування/декодування за допомогою різних реалізацій в залежності від вимог).

Список літератури: 1. Вологдин Э.И. Стандарты и системы цифровой звукозаписи / Э.И. Вологдин. – СПб: ГОУВПО 2012. – 156 с. 2. Еременко А.С. Исследование методов потоковой передачи мультимедийных данных с использованием TCP/HTTP / А . С . Еременко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий 2013. – 2/9 (62). – С.42-47. 3. Векслер Г.С. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Г.С. Векслер и др. – К.: Техніка, 1990. – 167 с. 4. Чижов И.И. О новом методе компрессии речевых сигналов / И.И. Чижов Т.Н. Созонова / Научные ведомости. – Белгородский государственный университет, 2009. – № 7. – С. 173-180. 5.

Безрук В.М. Выбор оптимальных речевых кодеков методами экспертного оценивания / В. М. Безрук // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – 3/2 (57). – С. 19-24. 6. Brtlett B. Recording music on location: capturing the live performance / B. Brtlett. – 2014. – Burlington, USA. 7. FLAC – format. Режим доступа: <http://manual.freeshell.org/flac-1.2.1/html/format.html>. – Дата посещения : 09 березня 2015.

Bibliography (transliterated): 1. Vologdin E.I. Standarti i sistemy cifrovoy zvukozapisi. SP: GOU-VOPO, 2012. 156. Print. 2. Eremenko A.S. Isledovanie metodov potokovoy peredaci multimediynih danih s ispolzovaniem TCP/HTTP. Vostochno-Evropeyskiy jurnal peredovih tehnologiy. 2013. 2/9 (62). 42-47 Print. 3. Veksler, G.S. et al. Podavlenije elektromagnitnyh pomeh v cepjah elektropitanija. Kyiv: Technika, 1990. Print. 4. Chigov I.I., Sozonova T.N. O novom metode kompresii rechevih signalov. Nauchnie vedomosti. Belgorodskiy gosudarstvenniy universitet, 2009. № 7. 173-180 Print. 5. Bezruk V.M. Vibor optimalnih rechevih kodekov metodami ekspertnogo ochenivaniya. Vostochno-Evropeyskiy jurnal peredovih tehnologiy. 2012. 3/2 (57). 19-24 Print. 6. Brtlett B. Recording music on location: capturing the live performance. Burlington, USA. 2014 Print. 7. FLAC – format >.. Web. 09 March 2015 < <http://manual.freeshell.org/flac-1.2.1/html/format.html> >.

Надійшла (received) 15.04.2015

УДК 621.319.53

В.М.ИВАНОВ, старш. научн. сотр., НИПКИ «Молния», НТУ «ХПИ», Харьков

ГЕНЕРАТОР ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Созданы и успешно прошли апробацию в заводских условиях генераторы высокого напряжения, содержащие импульсные трансформаторы с полупроводниковыми *IGBT* ключами в низковольтной цепи трансформатора, образца электрофизической установки для конверсии метана в составе коксового газа в синтез-газ при помощи высоковольтных импульсных объемных разрядов: коронного и барьерного. Размыкающий режим работы ключа позволяет избежать ограничения по амплитуде импульсов напряжения на нагрузке и полностью передать запасенную энергию в индуктивном накопителе.

Ключевые слова: электрофизическая установка, высоковольтный импульсный трансформатор, полупроводниковый ключ, импульсный коронный разряд, импульсный барьерный разряд.

Введение. Для многих электротехнологий и физических исследований создание импульсных генераторов напряжения позволяющих получать и использовать высокие напряжения и большие токи является актуальной зада-

© В.М.Иванов, 2015

чей. Такие генераторы, как правило, состоят из накопителя энергии, устройства умножения напряжения, коммутирующего элемента и системы управления и защиты. Ответственным элементом системы умножения установки является трансформатор. Сейчас в качестве устройства умножения интенсивно развивается новый специфический класс высоковольтных импульсных трансформаторов, так называемых трансформаторов Тесла, которые широко используются в установках для получения мощных импульсов напряжения. Он рассчитывается и изготавливается для каждого типа технологической операции. Разработан и изготовлен ряд высоковольтных импульсных генераторов на основе таких трансформаторов, что позволяет использовать возможности новых электротехнологических процессов, основанных на использовании прямого воздействия на материал сильных электрических и магнитных полей, применении плазмы газового импульсного коронного разряда для плазмохимических преобразований газовой среды и материалов, электроимпульсных методов воздействия на материал.

Цель статьи. Данная работа направлена на создание и апробацию генератора образца электрофизической установки, на основе высоковольтных импульсных трансформаторах с полупроводниковыми коммутаторами, получения импульсных высоковольтных разрядов для использования их при конверсии сырого коксового газа в газ, который содержит в основном синтез-газ.

Схема и особенности установки. Экспериментальный вариант установки – высоковольтного комплекса, описан в [1]. Схема замещения генератора образца электрофизической установки на основе импульсного трансформатора (ИТ) с полупроводниковым коммутатором в низковольтной цепи для осуществления в заводских условиях электротехнологии получения синтез-газа с высоковольтных разрядов приведена на рис. 1.

Отличительной чертой установки является наличие двух генераторов импульсов, работающих каждый на свою нагрузку – реактор с импульсным коронным или барьерным разрядом. В качестве высоковольтного источника импульсов напряжения используется усовершенствованный ИТ [2]. Каждый из двух генераторов состоит из источника питания, низковольтного генератора стартовых импульсов с *IGBT* ключом, импульсного повышающего трансформатора ИТ с нелинейной высоковольтной нагрузкой в виде реактора с коронным или барьерным разрядом и системы управления и защиты СУЗ. Высоковольтные импульсы от генераторов имеют различную амплитуду, форму и частоту следования. Нагрузкой одного генератора является реактор с импульсным коронным разрядом, а нагрузкой второго – реактор с импульсным барьерным разрядом.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: V_T – транзисторный *IGBT* коммутатор, V_D – встроенные в транзисторы обратные диоды *IGBT* ключа, C_H – низковольтная исходно заряженная емкость; C'_p , C_p – приведенная и реаль-

ная емкость высоковольтного реактора соответственно, $C'_p = \kappa^2 C_p$; $C_{ЭК}$ – емкость «эмиттер-коллектор» *IGBT* ключа, $C_{ЭК} \ll C'_p \ll C_H$; L_μ – индуктивность намагничивания ИТ; $L_{сн}$, $L'_{сб}$ – индуктивности рассеяния первичной и приведенная вторичной обмоток ИТ соответственно; C'_1 , C'_2 – емкости высоковольтного и низковольтного плеч ЕДН (в не приведенном к первичной обмотке ИТ виде, т.е. реальные емкости $C_1 \approx 2,8$ пФ, а $C_2 = 14,7$ нФ, коэффициент деления $K_d \approx 5250$) с согласующим сопротивлением R_c ; R'_p – приведенное активное сопротивление R_p коронного разряда в реакторе, $R'_p = R_p/\kappa^2$; i_k , i'_p , i_μ – соответственно коллекторный ток, приведенный ток через нагрузку – реактор, ток намагничивания (показаны стрелками); V – вольтметр.

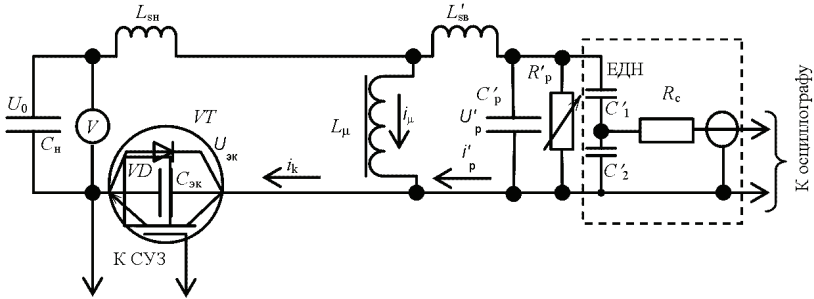


Рисунок 1 – Схема замещения генератора импульсов напряжения

Коммутирующим элементом в обоих генераторах выбраны *IGBT* транзисторы. Транзисторные ключи работают в режиме размыкающих коммутаторов. В этом режиме энергия, предварительно накопленная в конденсаторах низковольтной цепи каждого из двух импульсных генераторов, передается в нагрузку – реактор с импульсным объемным коронным или барьерным разрядом, через промежуточный индуктивный накопитель, которым является индуктивность намагничивания каждого импульсного трансформатора. Такой способ передачи энергии в нагрузку позволяет избежать принципиальных ограничений по амплитуде импульсов напряжения на нагрузке, имеющих место, когда транзисторный ключ работает в режиме замыкающего коммутатора [3].

Для нормальной работы генераторов с транзисторными *IGBT*-ключами в качестве размыкающих коммутаторов необходимо обеспечить отсутствие протекания тока в нагрузке – реакторе в момент размыкания ключа. Наличие такого тока приводит к появлению коротких и больших по амплитуде перенапряжений на транзисторных ключах. Эти перенапряжения могут превысить допустимые напряжения между коллектором и эмиттером в транзисторах ключа и привести к выходу из строя транзисторного ключа. Нормальный режим работы каждого генератора, при котором ток в реакторе отсутствует, обеспечивается соблюдением условий $U_0 = U'_p$, $U_{ЭК} = 0$ в момент размыкания

транзисторного ключа. Коллекторный ток i_k и ток намагничивания i_μ при этом равны друг другу. При таком режиме коммутации энергии из индуктивного накопителя в емкость C_p нагрузки реактора путем размыкания транзисторного ключа имеется возможность полной передачи энергии независимо от величин этих емкости и индуктивности.

$$L_\mu \times i_\mu^2 = C'_p \times U_p'^2 = C_p \times U_p^2,$$

откуда

$$U_p = i_\mu \times (L_\mu / C_p)^{1/2}. \quad (1)$$

При выборе варианта работы коммутирующего ключа, когда транзисторный ключ работает в режиме закорачивающего коммутатора, полностью энергия передается из основного низковольтного накопителя C_n в емкость нагрузки реактора C'_p только при выполнении условия равенства этих емкостей, то есть $C'_p = C_n$.

Из (1) следует, что напряжение на реакторе U_p пропорционально току намагничивания в момент размыкания ключа. Напряжение на реакторе ограничивается напряжением, которое может выдержать без выхода из строя транзисторный ключ при его размыкании.

Импульсное напряжение на реакторах контролировалось при помощи специально разработанного и изготовленного емкостного делителя напряжения [4].

Полученные результаты. Опытный образец установки состоит из двух генераторов исходных импульсов, двух высоковольтных импульсных трансформаторов, двух реакторов с объемными высоковольтными разрядами. В одном из двух реакторов создавался импульсный коронный разряд, в другом – импульсный барьерный разряд с использованием в рабочем объеме промышленного никелевого катализатора. В данной установке впервые применена двухступенчатая обработка высоковольтными объемными разрядами парогазовой смеси с целью парового риформинга метана в составе прямого (сырого) коксового газа в синтез-газ.

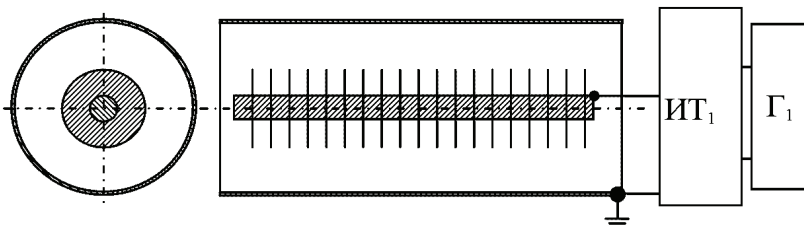


Рисунок 2 – Реактором с коронным разрядом в созданном опытном образце электрофизической установки

На рис. 2 и рис. 3 представлены в виде эскизов результирующие варианты конструкции реакторов с ИКР и ИБР в составе генератора высоковольтных импульсов.

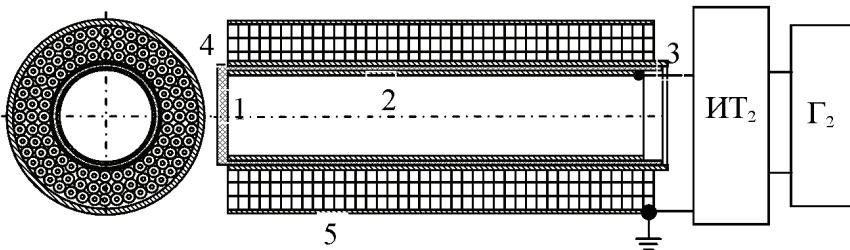


Рисунок 3 – Реактором с барьерным разрядом в созданном опытном образце электрофизической установки

В реакторе с коронным разрядом на рис. 2 электродная система выполнена соосной. Осевой электрод системы является высоковольтным коронирующим и представляет собой металлический стержень, на который нанизаны с определенным шагом тонкие параллельные друг другу коронирующие алюминиевые диски, плоскости которых перпендикулярны оси стержня. Внешний трубчатый электрод – заземленный. ИТ₁ – импульсный трансформатор, к вторичной обмотке которого подсоединен реактор с импульсным коронным разрядом, а к первичной – низковольтный силовой генератор исходных импульсов Г₁.

На рис. 3 приняты следующие обозначения: 1 – цилиндрический кварцевый барьер с торцевой стенкой, перекрывающий путь прохождению обрабатываемого газа мимо катализаторов; 2 – цилиндрический высоковольтный электрод, прилегающий изнутри к барьеру 1; 3 – цилиндрический промежуточный электрод, охватывающий барьер 1 снаружи; 4 – засыпка промышленным никелевым катализатором; 5 – цилиндрический внешний заземленный электрод барьерного реактора; ИТ₂ – импульсный трансформатор, к вторичной обмотке которого подсоединен реактор с импульсным барьерным разрядом и засыпкой никелевым катализатором, а к первичной – низковольтный силовой генератор исходных импульсов Г₂.

На рис. 4 представлены фото генераторов исходных импульсов Г₁ и Г₂ в установке, которые нагружаются на импульсные трансформаторы ИТ₁ и ИТ₂.

На рис. 5 и рис. 6 представлены фото импульсного трансформатора ИТ₁ для импульсного коронного разряда со стальным ленточным магнитопроводом и импульсного трансформатора ИТ₂ для барьерного коронного разряда с ферритовым магнитопроводом.

Фотографии изготовленных реакторов для получения импульсного коронного разряда и импульсного барьерного разряда показаны на рис. 7 и рис. 8, а на рис. 9 показана фотография двухступенчатой системы в сборе.



Рисунок 4 – Фотография низковольтный генераторов импульсов созданной электрофизической установки



Рисунок 5 – Фотография импульсного трансформатора ИТ₁



Рисунок 6 – Фотография импульсного трансформатора ИТ₂



Рисунок 7 – Фотография реактора для получения импульсного коронного разряда

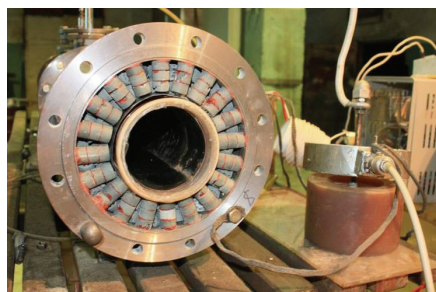


Рисунок 8 – Фотография реактора для получения импульсного барьерного разряда с катализатором

На рис. 10 приведены осциллограммы импульсов напряжения на коронном и барьерном реакторах, полученные при помощи емкостных делителей напряжения и двухканального цифрового осциллографа типа RIGOL во вре-

мя проведения экспериментов на установке с использованием высоковольтных импульсных разрядов и токов непосредственно на ПАО «ЯКХЗ» (Макеевка, Донецкая обл.).



Рисунок 9 – Фотография двухступенчатой системы в сборе

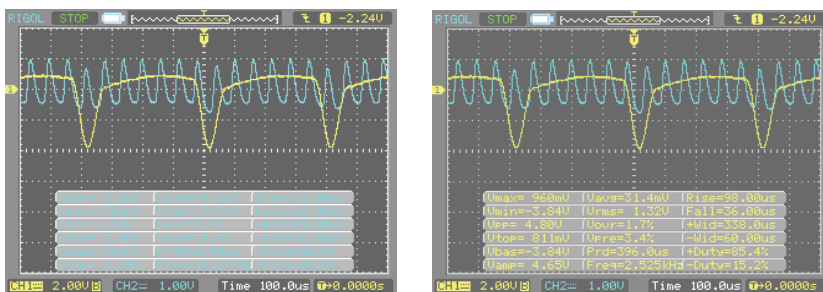


Рисунок 10 – Осциллограммы импульсов напряжения на реакторе с коронными разрядами (период повторения импульсов – примерно 400 мкс) и на реакторе с барьером из кварцевого стекла, заполненном никелевым катализатором (период повторения импульсов – примерно 60 мкс)

Выводы. В заводских условиях успешно апробован и отработаны оптимальные режимы работы высоковольтного генератора импульсного напряжения, содержащего повышающий высоковольтный импульсный трансформатор и полупроводниковые *IGBT* ключи в низковольтной цепи, электрофизической установки для конверсии метана в составе коксового газа в синтез-газ при помощи высоковольтных импульсных объемных разрядов: коронного и барьерного с засыпкой никелевым катализатором.

Список литературы: 1. Бойко Н.И. Электротехнология получения синтез-газа с использованием объемных высоковольтных импульсных разрядов: коронного и барьерного / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов, С.Ф. Коняга // *Электротехника і електромеханіка*. – 2014. – № 4. – С. 45-50. 2. Бойко Н.И. Высоковольтные импульсные трансформаторы в технологических установках / Н.И. Бойко, А.В. Борцов, А.В. Евдошенко, А.И. Зароченцев, В.М. Иванов // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2006. – № 36. – С. 8-13. 3. Международная научно-практическая конференция MicroCAD-2012 Тезисы докладов XX международной научно-практической конференции. – Ч.IV. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – С. 69. 4. Бойко Н.И. Компактный емкостный делитель напряжения на 70 кВ с экранированным промежуточным электродом / Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов, О.А. Христенко // *Электротехника і електромеханіка*. – 2012. – № 6. – С. 41-46.

Bibliography (transliterated): 1. Bojko N.I. Jelektrotehnologija poluchenija sintez-gaza s ispol'zovanіem ob'jomnyh vysokovol'tnyh impul'snyh razrjadov: koronnogo і bar'ernogo. N.I. Bojko, L.S. Evdoshenko, V.M. Ivanov, S.F. Konjaga. *Elektrotehnika і Elektromehanika*. 2014. No 4. 45-50 Print. 2. Bojko N.I. Vysokovol'tnye impul'snye transformatory v tehnologіcheskіh ustanovkah. N.I.Bojko, A.V.Borcov, L.S.Evdoshenko, A.I.Zarochencev, V.M.Ivanov. *Visnik NTU «KhPI»*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2006. No 36. 8-13 Print. 3. Mezhdunarodnaja nauchno-praktіcheskaja konferenciya MicroCAD-2012. Tezisy dokladov HX mezhdunarodnoj nauchno-praktіcheskoj konferencii. Part. IV. Kharkiv, NTU «KhPI». 2012. 69 Print. 4. Bojko N.I. Kompaktnyj jomkostnyj delitel' naprjazhenija na 70 kV s jekranirovannym promezhutochnym jelektrodom. N.I. Bojko, L.S. Evdoshenko, V.M. Ivanov, O.A. Hristenko. *Elektrotehnika і elektromehanika*. 2012. No 6. 41-46 Print.

Поступила (received) 01.04.2015

УДК 519.2

Г. М. КОЛИУШКО, канд. тех. наук., ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
О. С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ, вед. инженер, НТУ «ХПИ»;
Е. Г. ПОНУЖДАЕВА, зав. лаб., НТУ «ХПИ»;
Р. К. БОРИСОВ, канд. тех. наук., вед. науч. сотр., НИУ «МЭИ», Москва, Россия;
Д. И. КОВАЛЕВ, ст. преподаватель, НИУ «МЭИ», Москва, Россия

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ УСТРОЙСТВА БЛОКИРОВКИ ОПЕРАТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

В статье описаны конструкции четырех разработанных опытных образцов устройства блокировки оперативных переключений (УБОП) коммутирующих аппаратов высокого напряжения, используемых на энергообъектах, представлены преимущества и недостатки опытных образцов. В результате устранения недостатков разработан и изготовлен оптимальный вариант конструкции устройства, сохраняющий все преимущества, с которым можно ознакомиться в данной статье.

© Г. М. Колиушко, О. С. Недзельский, Е. Г. Понуждаева, Р. К. Борисов, Д. И. Ковалев, 2015

Ключевые слова: устройство блокировки оперативных переключений, электромагнитный механизм, оперативные блокировки безопасности.

Введение. С целью повышения надежности и безопасности выполнения оперативных переключений коммутирующих устройств высоковольтного оборудования энергообъектов были поставлены задачи по созданию и внедрению новых комплексов электротехнического оборудования (КЭО) с «интеллектуальным» управлением, в состав которых входят устройства блокировки оперативных переключений (УБОП). Эти устройства оснащены электромагнитным механизмом блокировки, что позволяет фиксировать состояние «ОТКРЫТО» – «ЗАКРЫТО» системой управления оперативными блокировками безопасности (ОББ).

Описание разработок. Специалисты Национального исследовательского университета «МЭИ» (г. Москва) и Национального технического университета «ХПИ» (г. Харьков) в совместном сотрудничестве разработали, изготовили и испытали ряд опытных образцов УБОП.

Все опытные образцы сохраняют посадочные размеры, диаметр и рабочий ход штока находящихся в эксплуатации устройств блокировки, например, замка ЗБ-1М, и соответствуют указанным в [1].

Внешний вид опытного образца №1 представлен на рис. 1.

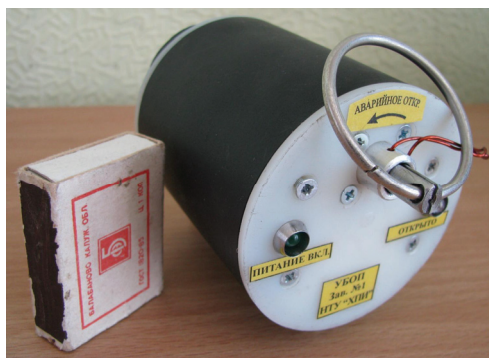


Рисунок 1 – Внешний вид опытного образца № 1

Опытный образец № 1 УБОП имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими аналогами:

- возможность снятия фиксации перемещения штока электромагнитным механизмом подачей сигнала от системы управления ОББ;

- повышение безопасности оперативных действий при переключениях за счет использования напряжения 24В постоянного тока питания цепей электромагнитного механизма;

- возможность включения на неограниченное время при потребляемой

мощности 4 Вт;

–оснащение светодиодными индикаторами состояний «ПИТАНИЕ ВКЛ.» и «ОТКРЫТО».

При испытаниях данного опытного образца и анализу его конструкции были выявлены следующие недостатки:

– сложность механизма фиксации штока, что понижает надежность работы и повышает стоимость изготовления деталей;

– габаритные размеры опытного образца №1 УБОП велики и требуют минимизации.

Испытательный стенд, на котором проводились экспериментальные исследования изображен на рис. 2.



Рисунок 2 – Испытательный стенд



Рисунок 3 – Внешний вид опытного образца № 2

Опытный образец № 2 разрабатывался одновременно с образцом № 1. Его внешний изображен на рис. 3.

Данный опытный образец имеет более надежный электромагнитный механизм. Особенность этого образца: отсутствие светодиодных индикаторов

состояния «ОТКРЫТО» и «ПИТАНИЕ ВКЛ.». Индикация состояния «ОТКРЫТО» – «ЗАКРЫТО» осуществляется с помощью герконового реле, встроенного в корпус. Срабатывание реле происходит при осевом перемещении штока, на котором размещен кольцевой магнит. Недостатки опытного образца № 2:

- трудоемкость изготовления деталей;
- большие габариты.

Так как опытный образец № 2 признан более надежным, его конструкция взята за основу для дальнейших разработок.

Одним из пожеланий заказчика является использование в качестве крепежных элементов двух винтов М5, проходящих в осевом направлении корпуса УБОП и входящих в резьбовые отверстия на неподвижной части привода коммутирующих устройств. Для осуществления такой возможности и устранения недостатков опытных образцов № 1 и № 2 разработан опытный образец № 3. Внешний вид показан на рис. 4.



Рисунок 4 – Внешний вид опытного образца № 3

Испытания опытного образца № 3 показали, что в результате существенного усовершенствования конструкции его работа более надежна. Однако, в данном образце применен более мощный электромагнит (7 Вт), корпус которого при длительной работе перегревается. Корпус образца № 3 УБОП, выполненный из пластика, не дает возможность рассеивать тепло. Для улучшения теплоотдачи корпуса электромагнита разработан опытный образец № 4, внешний вид которого изображен на рис. 5.

Конструкция и экспериментальные исследования термодинамических показателей работы опытного образца № 4 представлены в [3].

Анализ температурных показателей позволяет сделать вывод о том, что для конструкции опытного образца № 4 тепловой режим длительной работы электромагнита является допустимым. Недостатками данного опытного об-

разца являются:

- ненадежная работа системы ручного деблокирования;
- необходимость изготовления дополнительных деталей (заглушки клина, резиновые уплотнения для заглушек);
- тонкая балансировка усилий пружин.



Рисунок 5 – Внешний вид опытного образца № 4

Кинематическая схема разработанного опытного образца, оснащенного менее сложным механизмом фиксации штока, надежной системой ручного деблокирования, представлена на рис. 6.

Механизм УБОП работает следующим образом.

В максимально выдвинутом положении штока (1), что соответствует состоянию «ЗАКРЫТО», катушка электромагнита (9) обесточена. Пружина (10) удерживает рычаг (12) и соединенное с ним коромысло (15) таким образом, что в зафиксированном состоянии оказывается шток.

При подаче питания на катушку электромагнита его сердечник втягивается, вокруг оси (14) поворачивается рычаг (12) с коромыслом (15), освобождая шток (1). С помощью кольца (6), закрепленного на штоке (1) оператором производится перемещение штока в осевом направлении. При достижении положения «ОТКРЫТО» шток фиксируется посредством попадания подпружиненного коромысла в проточку на штоке.

После снятия напряжения питания электромагнита (9) пружина (10) возвращает толкатель (13) в первоначальное положение, рычаг (12) поворачивается вокруг оси (14), освобождая шток, который под действием возвратной пружины (5) вновь оказывается в положении «ЗАКРЫТО».

Ручное деблокирование устройства осуществляется поворотом рычага (12) вручную. При этом необходимо выкрутить пробку (11).

Корпус (2) выполнен из алюминиевого сплава, состоит из двух частей, скрепляемых винтами (8). На штоке (1) размещен кольцевой магнит (3), обеспечивающий срабатывание герконового реле (4).

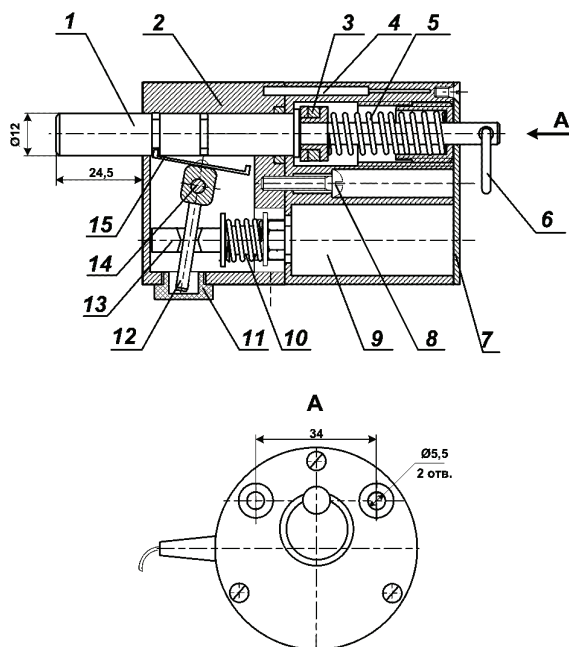


Рисунок 6 – Кинематическая схема опытного образца УБОП: 1 – шток; 2 – корпус; 3 – кольцевой магнит; 4 – герконовое реле; 5 – возвратная пружина; 6 – кольцо; 7 – крышка; 8 – винт; 9 – электромагнит; 10 – пружина; 11 – пробка; 12 – рычаг; 13 – толкатель; 14 – ось; 15 – коромысло

Выводы. В результате анализа конструкций опытных образцов УБОП определены их преимущества и недостатки. В работе представлена конструкция опытного образца УБОП, в которой сохранены все преимущества предыдущих разработок и устранены недостатки.

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

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

Список литературы: 1. Инструкция по эксплуатации оперативных блокировок безопасности в распределительных устройствах высокого напряжения. РД 34.35.512. Союзгхэнерго, 1979 г. 2. Устройство блокировки оперативных переключений (УБОП) комплекса электрооборудования нового поколения / Г.М. Колиушко, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждаева, Р.К. Борисов, С.И. Хренов, Д.И. Ковалев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 66-71. 3. Конструкция и термодинамические показатели опытного образца устройства блокировки оперативных переключений УБОП / Г.М. Колиушко, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждаева, А.В. Пличко, Д.И. Ковалев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 109-114.

Bibliography (transliterated): 1. Instrukcija po jekspluatacii operativnyh blokirovok bezopasnosti v raspredelitel'nyh ustrojstvah vysokogo naprjazhenija. RD 34.35.512. Sojuzgehjenergo, 1979 g. Print. 2. Ustrojstvo blokirovki operativnih perekljuchenij (UBOP) kompleksa elektrooborudovanija novogo pokolenija. G.M. Koliushko, O.S. Nedzelskyi, H.G. Ponuzhdayeva, R.K. Borisov, S.I.Khrenov, D.I. Kovalev. Visnik NTU "KhPI". Serija: Tehnika ta elektrophizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. No 21 (1064). 66-71. Print. 3. Konstrukcija i termodinamicheskie pokazateli opytnogo obrazca ustrojstva blokirovki operativnyh perekljuchenij UBOP G.M. Koliushko, O.S. Nedzelskij, H.G. Ponuzhdayeva, A.V. Plichko, D.I. Kovalev Visnik NTU "KhPI". Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. Kharkiv: NTU "KhPI"; 2014. No50 (1092). 109-114. Print.

Поступила (received) 16.03.2015

УДК 621.391.825

А.И. КОРОБКО, канд. техн. наук, зав отделом, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;

З.И. КОРОБКО, науч. сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ С РАДИОЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ В РЕЖИМЕ ОБРАТИМЫХ ОТКАЗОВ

Рассмотрена модель энергетического взаимодействия сверхширокополосных импульсных электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения с радиоэлектронными системами в режиме обратимых отказов. Проведен анализ двух основных путей образования ложных сигналов на выходах радиоэлектронных систем, которые характеризуют режим обратимых отказов: взаимодействие импульсного электромагнитного излучения с проводниками печатных плат и непосредственное взаимодействие излучения с активными полупроводниковыми элементами, которые являются составными частями радиоэлектронных систем. Представлена расчетная топологическая схема для анализа электромагнитных процессов в разветвленных радиоэлектронных системах. Проведен анализ практической применимости и реализуемости численных решений для расчетной топологической схемы. Рассмотрен механизм взаимодействия импульсного электромагнитного поля с основными элементами радиоэлектронных систем на основе энергетических характеристик этого взаимодействия. Приведены результаты анализа энергетического механизма взаимодействия.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное поле, радиоэлектронная система, обратимый отказ, печатная плата.

Введение. Как известно, процесс взаимодействия мощного импульсного электромагнитного излучения (ИЭМИ) естественного и искусственного про-

© А.И. Коробко, З.И. Коробко, 2015

исхождения с радиоэлектронными системами (РЭС) сопровождается появлением обратимых и необратимых отказов их функционирования [1].

Необратимые отказы функционирования РЭС возможно устранить исключительно путем ремонта или замены поврежденных радиоэлектронных элементов.

При обратимых отказах на сигнальных и информационных выходах РЭС появляются ложные сигналы, не свойственные РЭС в режиме ее нормального функционирования.

Одним из путей образования ложных сигналов, приводящих к обратимым отказам на выходе радиоэлектронных систем при воздействии на них импульсных электромагнитных излучений, является линейное взаимодействие (до момента межпроводникового электрического пробоя) электрической и магнитной составляющих ИЭМИ с проводниками печатных плат.

При этом одной из основных задач для решения проблемы обеспечения стойкости и защищенности радиоэлектронных систем является задача определения уровней импульсных напряжений и токов, действующих на радиоэлементы с учетом межэлементных соединений печатной платы.

Второй путь образования ложных сигналов на выходах РЭС – это внутриаэлементные процессы непосредственного полевого взаимодействия ИЭМИ с радиоэлектронными элементами (РЭЭ), входящими в состав РЭС (как пассивными, активными) [2].

Обзор методов. Данная задача принципиально может быть решена двумя путями: экспериментально или расчетным путем. Экспериментальный метод был в достаточной степени отработан для наносекундного диапазона воздействующих импульсных ИЭМИ, соответствующего амплитудно-временным параметрам электромагнитного импульса ядерного взрыва. Однако распространение этого накопленного опыта в субнаносекундную область сопровождается значительными трудностями, обусловленными метрологическими проблемами измерений импульсных напряжений и токов, а также влиянием первичного измерительного преобразователя на точность и достоверность измерений при переходе в субнаносекундную область.

Поэтому экспериментальный метод применяется, в основном, для определения уровней стойкости всей радиоэлектронной системы к поражающему воздействию импульсного ИЭМИ. Расчетные методы, получившие распространение в последнее время, базируются, в основном, на двух подходах: численное моделирование с использованием графических имитационных моделей фрагментов радиоэлектронных систем [2], или с использованием различных конечно – разностных методов [3-7] в чистом виде, или на основе и гибридных методов, использующих интегральные уравнения и конечно-разностный подход к их решению во временной области [8].

Эти методы дают удовлетворительное совпадение расчетных и экспери-

ментальных результатов во временной области [9-11], однако характеризуются сложностью применения в инженерной практике (конечно-разностные методы) и недостаточной точностью и ограниченностью применения (имитационные методы).

В работе [12] была разработана инженерная методика определения импульсных напряжений и токов, наводимых на компонентах РЭС, соединенных печатными проводниками, сочетающая в себе простоту использования методов расчета с графическим имитационным моделированием с точностью и достоверностью методик конечно – разностного типа.

Данная инженерная методика позволяет определять не только характеристики импульсных напряжений и токов, наводимых ИЭМИ на проводниках печатных плат РЭС, но и определить характеристики импульсных напряжений и токов на сигнальных и информационных выходах РЭС, в режиме обратимых отказов.

Типовая топологическая расчетная схема РЭС при этом имеет вид, представленный на рис. 1.

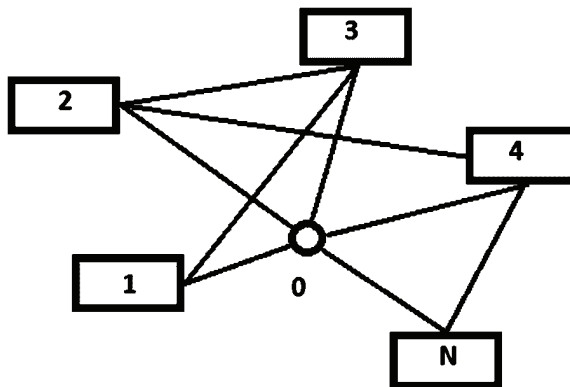


Рисунок 1 – Топологическая расчетная схема взаимодействия ИЭМИ с РЭС: 1,2,3, 4 ... N – радиоэлектронные элементы; 0 – сигнальный выход РЭС; 01, 02, 0,3 ,04... 0N – каналы связи радиоэлектронных элементов с выходом РЭС; 13, 23, 2,4. 2N – межэлементные каналы связи РЭС.

Однако данная методика имеет принципиальное ограничение, обусловленное вычислительными возможностями самой среды графически-имитационного моделирования Micro-Cap [12] – это ограничение максимального числа отрезков длинных линий в имитационной расчетной схеме, которые моделируют взаимодействие проводников печатных плат с ИЭМИ.

Цель работы. Целью работы является проведение качественного анализа энергетического механизма взаимодействия ИЭМИ с РЭС в режиме обра-

тимых отказов для определения предельных энергетических характеристик сигналов на сигнальных и информационных выводах РЭС.

Методика анализа. Как отмечено выше, существуют два основных механизма появления обратимых отказов РЭС в режиме их линейного взаимодействия с ИЭМИ в виде ложных сигналов: непосредственное взаимодействие РЭЭ с ИЭМИ и взаимодействие ИЭМИ с проводниками печатных плат.

При этом топологическая расчетная схема на рис.1, которая включает в себя как РЭЭ, так и каналы связи РЭЭ между собой и с сигнальным выходом РЭС предполагает наличие известных характеристик как источников сигналов, определяемых ИЭМИ, так и трактов (каналов связи) источников с сигнальным выходом РЭС.

РЭЭ и активного и пассивного типов и проводники печатных плат в линейном режиме одинаково взаимодействуют с ИЭМИ – в процессе их взаимодействия электрическая и магнитная энергии ИЭМИ преобразуются в электрическую энергию импульсов напряжений и токов, возникающих на их выводах.

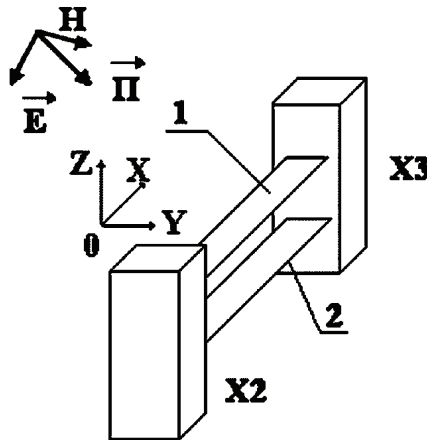


Рисунок 2 – Модель взаимодействия ИЭМИ с проводниками печатных плат (1,2) и РЭЭ (X1, X2)

В общем случае количественные характеристики этих импульсов зависят от ориентации по отношению к векторам ИЭМИ, геометрических размеров проводников и РЭЭ, характеристик подложки и параметров эквивалентных нагрузок (см. рис. 2).

Очевидно, что в самом худшем случае, когда вся энергия ИЭМИ преобразуется энергию наводимых на выводах РЭЭ и проводниках печатных плат, величина последней будет определяться следующим соотношением (во вре-

менном представлении) [13]:

$$W_{\Sigma}(t) = \int_S P_S(t) dt, \quad (1)$$

где $W_{\Sigma}(t)$ – энергия, наводимая на элементе; P_S – поток мощности ИЭМИ через поверхность S радиоэлемента.

В свою очередь $P_S(t)$ определяется выражением:

$$P_S(t) = E_S(t) \cdot H_S(t), \quad (2)$$

где $E_S(t)$, $H_S(t)$ – электрическая и магнитная составляющие ИЭМИ в данной точке поверхности S .

Для случая квазиравномерного облучения области S :

$$E_S(t) = E(t), \quad H_S(t) = H(t),$$

где $E(t)$, $H(t)$ – усредненные электрическая и магнитная составляющие ИЭМИ действующего в области S .

Из анализа (1) и (2) вытекает, что $W_{\Sigma}(t)$ для случая квазиравномерного облучения :

$$W_{\Sigma}(t) = E(t) \cdot H_S(t) \cdot S. \quad (3)$$

Следовательно, максимальные величины $W_{\Sigma}(t)$ будут соответствовать РЭЭ с максимальными величинами площадей S . То есть, энергия, наводимая в проводниках печатной платы существенно превосходит энергию, наводимую в более мелких РЭЭ.

Считая, что на выводах каждого из N радиоэлектронных элементов (см. рис.1) генерируется мощность $P_N(t)$, можно получить выражение для мощности сигнала помехи на выходе РЭС, (которая и обуславливает обратимый отказ РЭС при воздействии ИЭМИ с нулевыми начальными условиями):

$$P_{BNk}(t) = \int_0^t P'_N(\tau) \cdot K_k(t - \tau) d\tau, \quad (4)$$

где $K_k(t)$ – переходная характеристика k -того канала связи N -того РЭС с выходом РЭС.

Очевидно, что полная мощность сигнала помехи, обусловленного появлением обратимого отказа РЭС в линейном режиме определяется соотношением:

$$P_B(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M P_{BNk}(t), \quad (5)$$

где M – полное число каналов связи.

Из анализа (4) и (5) следует, что их максимальная величина P_{BNk} соответствует каналами связи, у которых $|K_k(t)| > 1$, то есть для усилительных каскадов.

Соответственно, импульсная мощность сигнала помехи на выходе РЭС потенциально не может превышать величину импульсной мощности, наводимую на конкретный РЭЭ, умноженную на коэффициент усиления канала по мощности. Разность между импульсной мощностью наводимый на кон-

кретный РЭЭ, и мощностью сигнала помехи есть мощность потребляемая конкретным каналом связи от источника питания РЭС (с учетом к.п.д.).

Выводы.

1. По величине импульсной мощности ложного сигнала на выходе РЭС и характеристическому импедансу информационного выхода РЭС можно оценить величины токов и напряжений ложных сигналов на выходе РЭС, соответствующих обратимым отказам.

2. Основными направлениями уменьшения уровней ложных сигналов, появляющихся на выходе РЭС за счет взаимодействия РЭЭ с ИЭМИ являются:

- оптимальная ориентация отдельных РЭЭ;
- электромагнитное экранирование отдельных РЭЭ и РЭС в целом;
- использование радиопоглощающих покрытий отдельных РЭЭ и РЭС в целом.

3. Из результатов анализа энергообменного взаимодействия вытекает один из перспективных методов диагностики факта возможного появления обратимых отказов путем измерения потребляемого РЭС тока при воздействии ИЭМИ.

4. Данный перспективный метод, в отличие от известных, не требует подсоединения измерительных средств к элементам схем РЭС, он требует подсоединения измерительных средств исключительно по цепи питания РЭС и к его выходу, что, как правило, не вызывает существенных технических затруднений.

Список литературы: 1. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / Под ред. Т.Р.Газизова. – Томск: Томский государственный университет, 2002. – 206 с. 2. Гайнутдинов Р.Р. Прогнозирование электромагнитных помех в межсоединениях печатных плат цифровых электронных средств при преднамеренном воздействии сверхширокополосного электромагнитного импульса / Р.Р. Гайнутдинов, З.М. Гизатуллин // Технологии электромагнитной совместимости. – 2010. – № 3 (34). – С. 44-52. 3. Lee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – May, 1996. – Vol. 14. – P. 302-307. 4. Baum C.E. Electromagnetic topology for the analysis and control of complex systems // Fast Electrical and Optical Measurements. – Thompson J.E. & Heussen L.H. – Nijhoff, Dordrecht, 1986. – Vol. 1. – P. 467-547. 5. Baum C.E., Liu T.K., Tesche F.M. On the analysis of general multiconductor transmission line networks // Interaction Note 461. – January 1988. 6. Cerry G., Russo P. A MFIE-FDTD hybrid method for the evaluation of the field inside metallic enclosures with slots // Proceeding of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Zurich, 2003. – P. 653-656. 7. Parmentier J.-P., Labaune G., Alliot J.-C., Degauque P. Electromagnetic topology on complex systems: topological approach // Interaction Note 488. – May 1988. 8. Marco L. Radiated susceptibility on the Printed-Circuit-Board level: simulation and measurement // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – 2005. – Vol. 3. – P. 471-478. 9. Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology theory on the test – bed aircraft EMPTAC // Interaction Note 506. – Nov. 1993. 10. Parmentier J.-P. at al. Analysis of EM coupling on large scale structures using EM topological concepts: application to the EMPTAC aircraft // Proc. ICEAA'95 Symp. – Torino, 12-15 Sept., 1995. –

P. 81-84. **11.** *Parmentier J.-P.* at al. An application of electromagnetic topology on the test-bed aircraft EMPTAC-ETE III // Interaction Note 527. – May, 1997. **12.** *Коробко А.И.* Инженерная методика определения импульсных напряжений и токов, наводимых на межэлементных соединениях печатной платы при воздействии импульсного электромагнитного поля / *А.И. Коробко, З.И.Коробко* // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – № 21 (1064). – С. 71-78. **13.** *Николький В.В. Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука. 1989. – 544 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Jelektromagnitnyj terrorizm na rubezhe tysjacheletijpod red. T.R.Gazizova. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2002. 206. Print. **2.** Gajnutdinov R.R. Prognozirovanie jelektromagnitnyh pomeh v mezhsjoedinenijah pechatnyh plat cifrovyh jelektronnyh sredstv pri prednamerennom vozdejstvii sverhshirokopolosnogo jelektromagnitnogo impul'sa. Gajnutdinov, Z.M. Gizatullin. Tehnologii jelektromagnitnoj sovmestivosti. 2010. No 3 (34). 44-52. Print. **3.** Lee K.S. Numeral solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media IEEE Trans. on Antennas and Propagation. Vol.14. May, 1996. 302-307. Print. **4.** Baum C.E. Electromagnetic topology for the analysis and control of complexsystems Fast Electrical and Optical Measurements. Vol. 1. Thompson J.E. & Heussen L.H.- Nijhoff, Dordrecht, 1986. 467-547. Print. **5.** Baum C.E., Liu T.K., Tesche F.M. On the analysis of general multiconductor transmission line networks Interaction Note 461. January 1988. Print. **6.** Cerry G., Russo P. A MFIE-FDTD hybrid method for the evaluation of the field inside metallic enclosures with slots Proceedingof IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Zurich, 2003. 653-656. Print. **7.** Parmentier J.-P., Labaune G., Alliot J.-C., Degauque P. Electromagnetic topology on complex systems: topological approach Interaction Note 488. May 1988. Print. **8.** Marco L. Radiated susceptibility on the Printed-Circuit-Board level: simulation and measurement IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. 2005. Vol. 3. 471- 478. Print. **9.** Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology theory on the test – bed aircraft EMPTAC Interaction Note 506. Nov. 1993. Print. **10.** Parmentier J.-P. at al. Analysis of EM coupling on large scale structures using EM topological concepts: application to the EMPTAC aircraft Proc. ICEAA'95 Symp. Torino, 12-15 Sept. 1995. 81-84. Print. **11.** Parmentier J.-P. at al. An application of electromagnetic topology on the test-bed aircraft EMPTAC-ETE III Interaction Note 527. May, 1997. Print. **12.** *Коробко А.И.* Inzhenernaya metodika opredeleniya impul'snykh napryazheniy i tokov, navodimykh na mezhelementnykh soyedineniyakh pechatnoy platy pri vozdejstvii impul'snogo jelektromagnitnogo polya. A.I. Korobko, Z.I.Korobko. Vestnik NTU «KHPi». Seriya: Tekhnika i yelektrofizika visokikh napryazheniy. Kharkiv: NTU «KHPi», 2014. No21 (1064). 71-78. Print. **13.** *Никольский В.В. Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. Moscow: Nauka, 1989. 544. Print.

Надійшла (received) 14.04.2015

В.И. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, НТУ «ХПИ»;
А.А. СЕРКОВ, д-р техн. наук, НТУ «ХПИ»;
В.С. БРЕСЛАВЕЦ, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»;
И. В. ЯКОВЕНКО, д-р физ.-мат. наук, НТУ «ХПИ»

ВЛИЯНИЕ СТОРОННЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СПЕКТР ПОВЕРХНОСТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей агнитного излучения. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетка, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Расширение областей применения и возрастание быстродействия радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) приводит к необходимости все большего использования элементной базы, содержащей изделия полупроводниковой электроники [1]. Это увеличивает степень влияния внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) на работоспособность РЭА, к воздействию которого полупроводниковые комплектующие обладают повышенной чувствительностью.

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. Моделирование механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), однако вопросы связанные с определением различного-рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделия при воздействии ЭМИ остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существую-

© В.И. Кравченко, А.А.Серков, В.С. Бреславец, И. В. Яковенко, 2015

ший пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике

Основные результаты. Для нахождения спектра и бесстолкновительного затухания поверхностных колебаний в условиях пренебрежения эффектом запаздывания электромагнитного поля воспользуемся следующими уравнениями

$$\operatorname{rot} \vec{E}(x, y, t) = 0; \quad \vec{E}(x, y, t) = \vec{E}(\omega, q_x, y) e^{i(q_x x - \omega t)}; \quad (1)$$

$$\vec{E}(\omega, q_x, y) = (E_x, E_y, 0);$$

$$\operatorname{div} \vec{D}(\omega, x, y) = 0;$$

$$\vec{D}(\omega, x, y) = \varepsilon_0(y) \vec{E}(\omega, x, y) + \frac{4\pi i}{\omega} \vec{j}(\omega, x, y); \quad (2)$$

$$\varepsilon_0(y) = \begin{cases} \varepsilon_{01}, & y > 0, \\ \varepsilon_{02}, & y < 0; \end{cases} \quad \vec{E} = \begin{cases} \vec{E}_1, & y > 0, \\ \vec{E}_2, & y < 0; \end{cases} \quad \vec{j} = \begin{cases} \vec{j}_1, & y > 0, \\ \vec{j}_2, & y < 0. \end{cases}$$

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 электрорадиоизделий 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

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

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 полуограниченной среды, как известно, идентичны свойствам безграничной. При этом результаты, полученные в [3] 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 плоско-

сти $y = 0$ и убывают при $y \rightarrow \pm \infty$. Очевидно, что такая модель вполне оправдана, если граница является прозрачной для частиц, то есть 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; ρ_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 [2]:

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

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

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

– 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:

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

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 оп-

ределяет 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:

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

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

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 полупространства $y < 0$ и $y > 0$: $A_x(-y) = A_x(y)$; $A_y(-y) = -A_y(y)$. При этом нормальная составляющая $\vec{A}(y)$ испытывает разрыв на плоскости $y = 0$. Подставляя значения $\vec{A}(\omega, \vec{r})$ в формулу (3) и интегрируя по всему пространству \vec{r} , получаем после замены суммирования \sum_k на интегрирование $\frac{V}{(2\pi)^3} \int d\vec{k}$.

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

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

Слагаемое, пропорциональное ρ_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 $k_x \gg q_x$, $\omega \gg q_x v_x$ 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 резуль-

тае интегрирования получаем:

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

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

Символ \int' означает, что интегрирование по k_y проводится в областях $\left(-\infty, -\sqrt{\frac{2m\omega}{\hbar}}; \sqrt{\frac{2m\omega}{\hbar}}, \infty\right)$, где возможен процесс излучения кванта энергии электроном. Аналогичное выражение для \vec{j}' легко получить в области $y < 0$.

Видно, что ток $\vec{j}'(\omega, \vec{r})$, возникающий в результате электронных переходов между состояниями k_y и k'_y , представляет собой бесконечный набор пространственных гармоник с периодом $\frac{2\pi}{|k_y - k'_y|}$, зависящим от частоты поля и импульса частицы, с амплитудой, убывающей от границы как $\exp(-\delta_\pm|y|)$. В классическом пределе $k_y^2, k_y'^2 \gg \frac{2m\omega}{\hbar}$ такого рода гармоники известны как «волны Ван-Кампена», фазовая скорость которых равна скорости частицы. Подставляя (6) в уравнение (7), находим потенциал, возбуждаемый током $\vec{j}'(\omega, x, y)$.

$$\begin{aligned} A'_x(\omega, q_x, y) &= \frac{i\alpha(\omega, q_x, y)}{\varepsilon(\omega)} A; \\ A'_y(\omega, q_x, y) &= \frac{A}{q_x \varepsilon(\omega)} \frac{\partial \alpha}{\partial y}(\omega, q_x, y); \\ \alpha(\omega, q_x, y) &= \frac{e^2 q_x m}{\pi^2 \hbar^2} \times \\ & \times \left\{ \int' \frac{\rho_k^0 d\vec{k}}{k_y^-(k_y \mp k_y^-)^4} \left[1 - \frac{\hbar(k_y \mp k_y^-)^2}{2m\omega} \right] \exp\{i(k_y \mp k_y^- \pm i\delta_\pm)y\} - \right. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\int' \frac{\rho_k^0 dk}{k_y^+ (k_y \mp k_y^+)^4} \left[1 - \frac{\hbar(k_y \mp k_y^+)^2}{2m\omega} \right] \exp\{i(\pm k_y^+ - k_y \pm i\delta_+)y\}$$

Здесь верхние знаки перед k_y^\mp и δ_+ 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 получить дисперсионное уравнение:

$$\varepsilon_1(\omega) \left[1 + i \frac{\alpha_2(\omega, q_x, 0)}{\varepsilon_2(\omega)} \right] + \varepsilon_2(\omega) \left[1 + i \frac{\alpha_1(\omega, q_x, 0)}{\varepsilon_1(\omega)} \right] = 0, \quad (12)$$

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

$$\omega_s = \left(\frac{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2}{\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}} \right)^{1/2}; \quad \Delta\omega_s = \frac{i\omega_s}{2} \frac{[\alpha_1(\omega, q_x, 0) + \alpha_2(\omega, q_x, 0)]}{\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02}}.$$

Найдем теперь декременты затухания в различных 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:

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

Отсюда получаем:

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

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

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

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

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

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:

$$\Delta\omega_s = -iq_x v_T \sqrt{\frac{T}{2\hbar\omega_s}}, \quad \hbar\omega_s \gg T;$$

$$\Delta\omega_s = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} iq_x v_T, \quad \hbar\omega_s \ll T. \quad (15)$$

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

Предложена модель взаимодействия электронов проводимости полупроводящей среды с поверхностными колебаниями, основанная на реализации резонансного (черенковского) взаимодействия движущихся зарядов и электромагнитных колебаний в условиях, когда совпадают фазовая скорость волны и скорость заряженной частицы.

Список литературы: 1. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А.* Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М., Вюраль Б.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М.* Электромагнитные явления СВЧ-диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Myrova L.O., Chepizhenko A.Z.* Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 Print. 2. *Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A.* Jelektromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz', 1979. 225 Print. 3. *Stil M., Vjural' B.* Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 Print. 4. *Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M.* Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka, 1991. 216 Print. 5. *Zi C.* Fizika poluprovodnikovovyh priborov. Moscow: Mir, 1984. 456 Print.

Поступила (received) 02.04.2015

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

А.А. СЕРКОВ, д-р техн. наук, НТУ «ХПИ»;

В.С. БРЕСЛАВЕЦ, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»;

И. В. ЯКОВЕНКО, д-р физ.-мат. наук, НТУ «ХПИ»

ВОЗДЕЙСТВИЕ СТОРОННЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ КОЛЕБАНИЙ С ЭЛЕКТРОНАМИ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетка, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. Моделирование механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), однако вопросы связанные с определением различного-рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделия при воздействии ЭМИ остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

© В.И. Кравченко, А.А.Серков, В.С. Бреславец, И. В. Яковенко, 2015

Основные результаты. В настоящей работе исследуются механизмы затухания поверхностных колебаний, когда их взаимодействие с электронами проводимости в условиях воздействия внешнего электромагнитного излучения на электрорадиоизделия носит характер столкновений.

Выражение для гамильтониана взаимодействия электронов с плазмонами, определяющее матричный элемент $W_{k_1 k_2}$, имеет вид:

$$\hat{H}^{(int)} = -\frac{1}{c} \int \hat{j}(r) \hat{A}(r) dr. \quad (1)$$

Здесь A – вектор-потенциал с калибровкой

$$div \vec{A} = 0; \quad \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}. \quad (2)$$

Он выражается через операторы рождения и уничтожения плазмонов (соответственно: $\hat{a}_q^{(+)}(t) = \hat{a}_q \exp(i\omega t)$; $\hat{a}_q(t) = \hat{a}_q \exp(-i\omega t)$) следующим образом:

$$A_\alpha(\vec{r}, t) = \sum_q A_\alpha(\vec{q}) \vec{e}_\alpha e^{iq\vec{r}} [\hat{a}_q(t) + \hat{a}_{-q}^{(+)}(t)];$$

$$e_{1x} = e_{2x} = \frac{q_x}{q\sqrt{2}}; \quad e_{1y} = -e_{2y} = \frac{i}{\sqrt{2}}; \quad e_{1z} = e_{2z} = \frac{q_z}{q\sqrt{2}}; \quad q = \sqrt{q_x^2 + q_z^2};$$

$$\omega_{-q} = \omega_q = \omega; \quad q_y = -iq, \quad y < 0; \quad q_y = iq, \quad y > 0. \quad (3)$$

Величина A_q находится в результате квантования энергии электромагнитного поля поверхностного плазмона

$$\hat{H}^{(em)} = \frac{\omega^2}{8\pi c^2} \int [\hat{A}(\omega, r)]^2 \frac{d}{d\omega} (\omega \varepsilon(\omega)) d\vec{r}. \quad (4)$$

где интегрирование проводится по всей области локализации поверхностного плазмона. Подставляя в (4) $[\hat{A}(\omega, r)]^2$, приравнявая

$$H^{(em)} = \sum \frac{\hbar \omega_q}{2} [\hat{a}_q \hat{a}_q^+ + \hat{a}_q^+ \hat{a}_q], \quad \text{получим } A_q = \left(\frac{4\pi e^2 \hbar q c^2}{S \omega_q (\varepsilon_o + \varepsilon_d)} \right)^{1/2} \quad \text{где } S - \text{площадь}$$

поверхности образца.

Оператор плотности электронного тока имеет вид:

$$\vec{j} = \frac{e\hbar}{2im_0} [\hat{\Psi}^+ \nabla \hat{\Psi} - \hat{\Psi} \nabla \hat{\Psi}^+];$$

$$\hat{\Psi}^+ = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum \hat{b}_k^+(t) \exp(-i(k_x x + k_z z)) \sin k_y y;$$

$$\hat{\Psi} = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum \hat{b}_k(t) \exp(i(k_x x + k_z z)) \sin k_y y;$$

(5)

$$V = SL; \quad k_y = \frac{\pi}{L} n; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

где $b_k^{(+)}(t) = b_k^{(+)} e^{\frac{iE_k t}{\hbar}}$; $b_k(t) = b_k e^{-\frac{iE_k t}{\hbar}}$ – операторы рождения и уничтожения электронов с волновым вектором \vec{k} .

Проведя в выражении (2) интегрирование, получим:

$$H^{(e3)} = \sum_{k_1 q k_2} W_{k_1 q k_2} b_{k_1}(t) (a_q(t) + a_{-q}^+(t)) b_{k_2}^+(t),$$

где

$$W_{\vec{k}_1 \vec{q} \vec{k}_2} = \frac{2k_{1y} k_{2y} (k_1^2 - k_2^2) W_0 q_x}{[(q^2 + (k_{2y} - k_{1y})^2) [(q^2 + (k_{2y} - k_{1y})^2) |q_x|]};$$

$$W_0 = \left(\frac{2\pi e^2 q_x \hbar^3}{m_0^2 L_y^2 S \omega_q (\varepsilon_0 + \varepsilon_d)} \right)^{1/2}.$$

Видно, что матричный элемент обладает следующими свойствами:

$$W_{\vec{k}_1 \vec{q} \vec{k}_2} = -W_{\vec{k}_2 \vec{q} \vec{k}_1} = W_{\vec{k}_1 - \vec{q} \vec{k}_2}.$$

Учитывая закон сохранения энергии $E_2 = E_1 - \hbar \omega_{\vec{q}}$ и полагая $q^2 \ll (k_{2y} - k_{1y})^2$; $q \ll k_x$; $q \ll k_z$ получим следующее выражение для матричного элемента:

$$\left| W_{\vec{k}_1 \vec{q} \vec{k}_2} \right|^2 = W_0^2 \left(\frac{\hbar k_y^{(+)} k_y}{m \omega_q} \right)^2; \quad k_y^+ = \sqrt{k_y^2 + \frac{2m\omega_q}{\hbar}}.$$

Декремент колебаний $\gamma = \frac{1}{2N_q} \frac{\partial N_q}{\partial t}$ определяется процессами инду-

цированного излучения и поглощения волн частицами: $N_q \gg 1$ &

Кинетическое уравнение для поверхностных плазмонов имеет вид:

$$\frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum \left| W_{k_1 q k_2} \right|^2 \delta(E_1 - E_2 - \hbar \omega_{\vec{q}}) [(N_{\vec{q}} + 1) n_{\vec{k}_1} (1 - n_{\vec{k}_2}) - (6)$$

$$- N_{\vec{q}} n_{\vec{k}_{21}} (1 - n_{\vec{k}_1})],$$

где N_q – число поверхностных плазмонов в состоянии q ; $n_{k_{1,2}}$ – число элект-

тронов в состояниях $k_{1,2}$; $E_{1,2} = \frac{\hbar^2 k_{1,2}^2}{2m}$ – закон дисперсии электронов; $W_{k_1 q k_2}$ –

матричный элемент, характеризующий вероятность перехода электронов между состояниями $k_1 \rightarrow k_2$. Первый член правой части уравнения описывает процесс спонтанного и индуцированного излучения поверхностных плазмонов при переходе электронов из состояния k_1 в состояние k_2 ; второй – про-

цессы поглощения плазмонов при обратных переходах. В левой части уравнения отсутствует член $v_{xp} \frac{\partial N_q}{\partial \vec{r}}$, поскольку предполагается, что плазмоны не обладают дисперсией и их групповая скорость равна нулю. Особенность кинетического уравнения заключается в том, что закон сохранения импульса плазмонов и электронов выполняется только в направлении параллельном границе раздела сред, поскольку пространство вдоль оси OY неоднородно:

$$k_{1x} = k_{x2} + q_x; \quad k_{1z} = k_{z2} + q_z.$$

Предполагается, что плазменная среда (среда 1) занимает область пространства $0 \leq y \leq L$ $\left(\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right)$. Границы $y = 0$; $y = L$ являются идеально отражающими, а области $y < 0$; $y > L$ занимает диэлектрик (вакуум) $\varepsilon_2 = \varepsilon_d$. Глубина проникновения поля плазмона остается малой по сравнению с L , то есть поля локализованы на границах $y = 0$; $y = L$ независимо друг от друга. Мы рассмотрим взаимодействие электронов и плазмонов вблизи границы $y = 0$.

Переходя в кинетическом уравнении (6) от суммирования к интегрированию $\left(\sum_{k_y} = \frac{L}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk_y \right)$ получим следующее выражение для декремента:

$$\gamma = \frac{W_0^2 VL}{4\pi^3 m \hbar \omega_q^2} \int_{k_y > 0} dk k_y^+ k_y^2 (n_{k^{(+)}} - n_k). \quad (7)$$

Рассмотрим случай максвелловского распределения электронов:

$$n_k = n_0 \frac{(2\pi\hbar)^3}{(2\pi m T)^{3/2}} \exp\left(-\frac{\hbar^2 k^2}{2mT}\right).$$

Подставляя значения W_0 ; n_k в формулу (7) и используя закон дисперсии поверхностных плазмонов $\omega_q^2 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_0 + \varepsilon_d}$ получим:

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\pi}} q_x v_T \left(\frac{T}{\hbar\omega} \right) \left(\exp\left(-\frac{\hbar\omega}{T}\right) - 1 \right) \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \sqrt{x^2 + \frac{\hbar\omega}{T}} \exp(-x^2) dx. \quad (8)$$

Легко убедиться, что формула (7) в предельных случаях дает те же значения декремента, что и выражения (8)&

В случае вырожденного электронного газа разность $n_{k^+} - n_k = n_k(\varepsilon_F + \hbar\omega) - n_k(\varepsilon_F)$ при $\varepsilon_F \gg \hbar\omega$ можно представить в виде $\frac{\partial n_k}{\partial \varepsilon_F} \hbar\omega$, где $\frac{\partial n_k}{\partial \varepsilon_F} = n_k \delta(\varepsilon - \varepsilon_F)$; $n_k = 1$. В результате интегрирования (7)

получим снова выражение) для γ в случае зеркального отражения электронов от границы.

Таким образом, представление о взаимодействии поверхностных плазмонов и электронов как о столкновительном процессе приводит к тем же результатам, что и метод дисперсионных соотношений. Кроме того, использование модели однородной плазмы является правомочным не только в классическом, но и в квантовом приближении.

Исследуем механизмы спонтанного излучения частиц, когда $N_q \ll 1$. Рассмотрим излучение, создаваемое одной частицей $n_k = \delta_{kk_0}$, движущейся со скоростью v_0 . В этом случае из уравнения (1) следует при $q_x \ll k_x$; $q_z \ll k_z$:

$$\frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t} = \frac{4mL}{\hbar^3} \int_0^\infty |W_{k_0,ky}|^2 \delta(k_0^2 - k_y^2 - \frac{2m\omega_q}{\hbar}) dk_y. \quad (9)$$

Принимая во внимание условие $k_0^2 \gg \frac{2m\omega_q}{\hbar}$, определим мощность спонтанного излучения электрона:

$$\hbar\omega_q \frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t} = \frac{4\pi e^2 q v_0^3}{V\omega_0^2}. \quad (10)$$

Если число электронов в состоянии « k_0 » равно n_{k_0} то правую часть необходимо умножить на эту величину. Сравним мощность излучения с величиной потерь энергии частицы при ее отражении от границы раздела сред.

Поля, создаваемые частицей, будем описывать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E}(\vec{r}, t) &= 0; \quad \text{div } \vec{D} = 4\pi e \delta(x) [\delta(y - v_0 t) + \delta(y + v_0 t)] \delta(z); \\ \vec{D}(\vec{r}, t) &= \int_0^t \varepsilon(t - t') \vec{E}(\vec{r}, t') dt', \quad y > 0; \\ \text{rot } \vec{E}(\vec{r}, t) &= 0, \quad \text{div } \vec{D} = 0; \\ \vec{D}(\vec{r}, t) &= \varepsilon_d \vec{E}(\vec{r}, t), \quad y < 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Фурье-компоненты поля частицы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \sum_{q_x, q_z} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}(\omega, \vec{q}, y) e^{i(\vec{q}\vec{r} - \omega t)} d\omega, \quad q = \sqrt{q_x^2 + q_z^2}; \\ E_x(\omega, \vec{q}, y) &= -\frac{ieq_x v_0 \cos \frac{\omega}{v_0} y}{\pi^2 \varepsilon(\omega) S(\omega^2 + q^2 v_0^2)}; \end{aligned}$$

$$E_y(\omega, \bar{q}, y) = -\frac{ie\omega \sin \frac{\omega}{v_0} y}{\pi^2 \varepsilon(\omega) S(\omega^2 + q^2 v_0^2)};$$

$$\varepsilon(\omega) = \int_0^\infty \varepsilon(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau. \quad (12)$$

В дальнейшем $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$; $\omega^2 \gg q^2 v_0^2$. К этим полям необходимо

добавить свободные поля, представляющие собой решения однородных уравнений в средах «1» - «2»:

$$E_x(\omega, \bar{q}, y) = A_1 e^{-qy}, \quad E_y(\omega, \bar{q}, y) = i \frac{q}{q_x} A_1 e^{-qy}, \quad y > 0;$$

$$E_x(\omega, \bar{q}, y) = A_2 e^{qy}, \quad E_y(\omega, \bar{q}, y) = -i \frac{q}{q_x} A_2 e^{qy}, \quad y < 0. \quad (13)$$

Из граничных условий находим:

$$A_1 = \frac{ieq_x v_0}{\pi^2 \varepsilon(\omega)} \frac{\varepsilon_d}{(\varepsilon(\omega) + \varepsilon_d)}; \quad A_2 = -\frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_d} A_1. \quad (14)$$

Нормальная составляющая электрического поля в среде «1» приобретает вид:

$$\vec{E}_y(\vec{r}, t) = -\frac{8\pi e v_0}{S(\varepsilon(\omega) + \varepsilon_d)} \sum_{q_x, q_z} \frac{q}{\omega_q} e^{iq\vec{r}} \sin \omega t, \quad t > 0;$$

$$\vec{E}_y(\vec{r}, t) = 0, \quad t < 0. \quad (15)$$

При интегрировании по $d\omega$ учитывалась частота столкновений $\nu \ll \omega$ для выбора правильного обхода полюсов: $\omega = -\frac{i\nu}{2} \pm \omega_q$.

Выводы. 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 в условиях воздействия внешнего электромагнитного излучения на полупроводниковые комплектующие электрорадиоизделий.

Определены кинетические механизмы затухания поверхностных плазмонов на границе полупроводник – диэлектрик, основанные на представлениях о волнах Ван-Кампена. Показано, что затухание колебаний такого рода связано с тем, что колебания возбуждают на границе раздела сред волны Ван-Кампена, которые модулируются полем поверхностной волны и уносят энергию поля вглубь среды.

Исследованы процессы бесстолкновительного затухания поверхностных колебаний, когда взаимодействие волн и частиц носит характер случайных

столкновений и описывается методом вторичного квантования системы (представление чисел заполнения).

Список литературы: 1. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А.* Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М., Вюраль Б.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М.* Электромагнитные явления СВЧ-диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Myrova L.O., Chepizhenko A.Z.* Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 Print. 2. *Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A.* Jelektromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svyazi. Moscow: Radio i svjaz', 1979. 225 Print. 3. *Stil M., Vjural' B.* Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 Print. 4. *Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M.* Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka, 1991. 216 Print. 5. *Zi S.* Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir, 1984. 456 Print.

Поступила (received) 03.04.2015

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, НТУ «ХПИ»;
А.А. СЕРКОВ, д-р техн. наук, НТУ «ХПИ»;
В.С. БРЕСЛАВЕЦ, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»;
И. В. ЯКОВЕНКО, д-р физ.-мат. наук, НТУ «ХПИ»

ВОЛНОВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ПОТОКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих

© В.И. Кравченко, А.А. Серков, В.С. Бреславец, И. В. Яковенко, 2015

структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетка, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковские и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Расширение областей применения и возрастание быстродействия радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) приводит к необходимости все большего использования элементной базы, содержащей изделия полупроводниковой электроники [1]. Это увеличивает степень влияния внешнего электромагнитного излучения (ЭМИ) на работоспособность РЭА, к воздействию которого полупроводниковые комплектующие обладают повышенной чувствительностью.

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния ЭМИ на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. Моделирование механизмов взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), однако вопросы связанные с определением различного-рода электромагнитных взаимодействий, протекающих непосредственно в комплектующих изделия при воздействии ЭМИ остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

1. Основные результаты. В данной работе показано, что затухание плазмонов вызвано их 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

В дальнейшем, зависимость всех переменных величин, входящих в уравнения (1)-(4), от координат и времени выбираем в виде $\vec{E}(x, y, t) = \vec{E}(\omega, q_x, y) \exp[i(q_x x - \omega t)]$, $\omega > 0$; $q_x > 0$. 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:

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

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

$$\bar{D}(x, y, t) = \int_{-\infty}^t \hat{\varepsilon}(t-t') \bar{E}(x, y, t') dt';$$

$$\bar{J}(x, y, t) = e \int \bar{v} f(x, y, t, \bar{p}) d\bar{p}, \quad (3)$$

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

Тогда

$$\bar{D}(\omega, q_x, y) = \varepsilon(\omega) \bar{E}(\omega, q_x, y), \quad (4)$$

$\varepsilon(\omega) = \int_0^{\infty} \hat{\varepsilon}(t) \exp(i\omega t) dt$ – диэлектрическая проницаемость среды. Предпола-

гая, что $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$, где ε_0 – диэлектрическая постоянная решетки, ω_0 – ленгмюровская частота электронов проводимости среды, а $\omega > 0$, $q_x > 0$.

Решение кинетического уравнения (1) можно представить в виде:

$$f = -\frac{e}{v_y} \int_C^y \bar{E} \frac{\partial f_0}{\partial \bar{p}} \exp\left[\frac{i\tilde{\omega}}{v_y}(y-y')\right] dy'; \quad \tilde{\omega} = \omega - q_x v_x + i\nu, \quad v_y > 0. \quad (5)$$

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:

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

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 $\vec{E}(y+z)$ в ряд по z , получим:

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

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:

$$f_2(y) = \frac{e}{i\omega} \frac{\partial f_0}{\partial \vec{p}} \left[\vec{E}_2(y) + \vec{F}(y) \exp\left(\frac{i\omega^*}{\nu_y} y\right) \right], \quad \omega^* = \omega + i\nu, \quad (9)$$

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

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

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

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

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

где $\varepsilon_1(\omega) = 1 - \omega_b^2 / \omega^2$; $\varepsilon_2(\omega) = \varepsilon(\omega) - \omega_0^2 / \omega^2$; ω_b – ленгмюровская частота электронов пучка.

Система уравнений (1) – (4) для каждой из сред преобразуется к уравнениям:

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

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

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:

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

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 \vec{D} и тангенциальных составляющих \vec{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.

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 через $f_0^\pm(\vec{p}) = n_0 \delta(p_x) \delta(p_y \mp p_0) \delta(p_z)$ функции распределе-

ния 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:

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

$$f^-(\bar{p}, y) = \frac{e}{i\omega} \bar{E}_1(y) \frac{\partial f_0^-(\bar{p})}{\partial \bar{p}} - C(\bar{p}, y) \exp\left(\frac{i\omega^* y}{v_y}\right); \quad (21)$$

$$C(\bar{p}, y) = \frac{e}{i\omega} \times \left[\bar{E}_1(y) \frac{\partial f_0^-(\bar{p})}{\partial \bar{p}} + E_{y1}(0) \frac{\partial f_0^-(-p_y)}{\partial p_y} - E_{x1}(0) \frac{\partial f_0^-(-p_y)}{\partial p_x} \right].$$

Уравнение (12) преобразуется к виду:

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

Из уравнений (21)-(22) следует:

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

Электрическая индукция в среде 1: $D_{y1}(\omega, q_x, y) = \varepsilon_1(\omega) \times E_{y1}(\omega, q_x, y) + \frac{4\pi e}{\omega} \int v_y f^-(\bar{p}, y) d\bar{p}$ 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 заряженных частиц, распределение которых в импульсном пространстве описывается функцией:

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

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:

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

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

Предложена модель взаимодействия наведенных внешним ЭМИ токов с электростатическими колебаниями структуры металл – диэлектрик – полупроводник (МДП), основанная на реализации резонансного (черенковского) взаимодействия движущихся зарядов и электромагнитных колебаний в условиях, когда совпадают фазовая скорость волны и скорость заряженной частицы.

Список литературы: 1. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А.* Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М., Вюраль Б.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М.* Электромагнитные явления СВЧ-диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Myrova L.O., Chepizhenko A.Z.* Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 Print. 2. *Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A.* Jelektromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz', 1979. 225 Print. 3. *Stil M., Vjural' B.* Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 Print. 4. *Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M.* Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka, 1991. 216 Print. 5. *Zi C.* Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir, 1984. 456 Print.

Поступила (received) 10.04.2015

В.И. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, НТУ «ХПИ»;
А.А. СЕРКОВ, д-р техн. наук, НТУ «ХПИ»;
В.С. БРЕСЛАВЕЦ, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ»;
И. В. ЯКОВЕНКО, д-р физ.-мат. наук, НТУ «ХПИ»

ВОЛНОВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКИ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетка, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Моделирование механизмов возникновения необратимых отказов, возникающих вследствие взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой).

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния электромагнитного излучения (ЭМИ) на радиоизделия относятся к области необратимых отказов (как известно, все типы отказов, возникающие в электрорадиоизделиях принято разделять на обратимые и необратимые [1, 2]). Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности изделия. Они наступают в случае, когда изменение рабочих характеристик аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего электромагнитного необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового проboя комплектующих).

В тоже время, для обратимых отказов, характеризуемых временной ут-

ратой работоспособности, использование теории цепей не позволяет определять искажения выходных характеристик радиоизделий. Поэтому, большинство вопросов, связанных с определением механизмов обратимых отказов, связанных с влиянием наведенных токов на работоспособность изделия в области обратимых отказов остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

1. Основные результаты. Предполагается, что в результате воздействия ЭМИ, в периодической структуре, состоящей из полупроводниковых пластин (полупроводниковая сверхрешетка), возникает поток заряженных частиц, который теряет часть своей энергии на возбуждение ее собственных электромагнитных колебаний

В статье исследуются дисперсионные характеристики данной структуры и механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с электростатическими колебаниями. Получены выражения для собственных частот и определены энергетические потери наведенных ЭМИ токов на их возбуждение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах электромагнитных волн.

Определим спектр и затухание (нарастание) электромагнитных колебаний такой системы. Выбираем систему отсчета таким образом, чтобы оси X , Y были направлены параллельно, а ось Z – перпендикулярно границе раздела. Заметим, что потери энергии заряженной частицы при прохождении через слоистый диэлектрик впервые рассматривались в работе [3].

Пусть моноэнергетический нейтральный поток заряженных частиц с плотностью n_0 проходит с постоянной скоростью v_0 через периодическую структуру (период q), состоящую из чередующихся плазменных слоев d_1 , d_2 и различающихся диэлектрическими постоянными концентрациями электронов проводимости N_{01} , N_{02} .

На границе слоев выполняются условия непрерывности потенциалов и полных токов J_i (смещения и проводимости):

$$\varphi_1(0) = \varphi_2(0); \quad J_1(0) = J_2(0), \quad (1)$$

где $J_i = \frac{\varepsilon_{0i}}{4\pi} \frac{\partial E_{iz}}{\partial t} + e(N_{0i}u_{iz} + n_0v_{iz} + v_0n_i)$, $i = 1, 2$.

Для описания электромагнитных свойств структуры состоящей из плазменных слоев, в пренебрежении эффектами запаздывания, воспользуемся следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
\operatorname{rot} \vec{E} &= 0, \quad \operatorname{div}[\varepsilon_0(z)\vec{E}] = 4\pi e(N+n); \\
\frac{\partial N}{\partial t} + \operatorname{div}[N_0(z)\vec{u}] &= 0; \quad m \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = e\vec{E}; \\
\frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n_0\vec{v} + \vec{v}_0 n) &; \quad m\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + v_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial z}\right) = e\vec{E}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Здесь $n(r,t), N(r,t), v(r,t), u(r,t)$ – возмущенные концентрации и скорости электронов пучка и неподвижной плазмы, $\varepsilon_0(z); N_0(z)$ – являются периодическими функциями, принимающими в пределах $d = d_1 + d_2$ значения $\varepsilon_{01,02}; N_{01,02}$. Индексы «1» и «2» будут означать принадлежность величин, входящих в уравнения (4.66) к слоям с индексами толщины «1» и «2». В дальнейшем необходимо ввести скалярный потенциал $\varphi(r,t)$; ($\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi$).

В связи с образованием в структуре волн пространственного заряда (ВПЗ), обусловленных движущимся потоком частиц, возникает необходимость в дополнительных граничных условиях. В качестве таковых используются непрерывности потоков заряженных частиц и их импульсов. Эти условия имеют вид:

$$n_1(0) = n_2(0); \quad v_{1z}(0) = v_{2z}(0). \tag{3}$$

Используя свойство трансляционной симметрии $\varphi(z+d) = \varphi(z)\exp(ikd)$ (k – произвольный волновой вектор), можно представить граничные условия на плоскостях, разделяющих слои, следующим образом:

$$\begin{aligned}
\varphi_1(d_1) &= \varphi_2(-d_2)\exp(ikd), \quad J_1(d_1) = J_2(d_2)\exp(ikd); \\
n_1(d_1) &= n_2(-d_2)\exp(ikd), \quad v_{1z}(d_1) = v_{2z}(-d_2)\exp(ikd).
\end{aligned} \tag{4}$$

Представляя зависимость всех переменных величин от координат и времени экспоненциальной, легко получить решение уравнений в каждом слое. С помощью граничных условий (2)-(3) можно исключить неопределенные константы и получить дисперсионное уравнение, связывающее между собой частоту, волновые векторы – $\omega, q_{x,y}, k$ и параметры среды.

Рассмотрим одномерный случай: $q_x = 0$. Решение системы уравнений (1) в i -м слое имеет вид:

$$\begin{aligned}
\varphi_i(z) &= A_i z + B_i + \frac{4\pi e^2 v_0}{\varepsilon_i} \left[\frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{(\omega + v_0 \lambda_i)^2} + \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{(\omega - v_0 \lambda_i)^2} \right] \exp\left(i \frac{\omega}{v_0} z\right); \\
E_i &= -A_i - \frac{4\pi i e v_0}{\varepsilon_i} \left[\frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{\omega + v_0 \lambda_i} + \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{\omega - v_0 \lambda_i} \right] \exp\left(i \frac{\omega}{v_0} z\right); \\
n_i &= (C_i \exp(i\lambda_i z) + F_i \exp(-i\lambda_i z)) \exp\left(i \frac{\omega}{v_0} z\right);
\end{aligned} \tag{5}$$

$$v_i = -\frac{4\pi e^2}{m\lambda_i \varepsilon_i} \left[\frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{\omega + v_0 \lambda_i} - \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{\omega - v_0 \lambda_i} \right] \exp\left(i \frac{\omega}{v_0} z\right) + \frac{eA_i}{im\omega}.$$

Здесь $\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}$; $\lambda_i = \frac{\omega_0}{v_0 \sqrt{\varepsilon_i}}$; ω_{0i}, ω_0 – ленгмюровские частоты

электронов неподвижной плазмы и пучка A, B, C, F – произвольные постоянные. Видно, что потенциал содержит слагаемые различного рода. Первое и второе представляют собой решение уравнения Лапласа $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$, третье и четвертое – потенциалы, создаваемые ВПЗ. Легко убедиться, что граничные условия допускают решения $A_i = 0$, так как при этом $J_i(z)$ тождественно обращается в нуль, концентрация и скорость частиц зависят от констант C, F , а граничные условия для потенциалов (3) и (4) позволяют определить B_1, B_2 через C, F . При этом из граничных условий получим дисперсионное уравнение:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = \cos \lambda_1 d_1 \cos \lambda_2 d_2 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{2\lambda_1 \lambda_2} \sin \lambda_1 d_1 \sin \lambda_2 d_2. \quad (6)$$

Это уравнение впервые было получено в работе [4], где была показана возможность возникновения неустойчивых состояний. При этом в [80] не принимались во внимание связанные с частотной дисперсией диэлектрической проницаемости собственные колебания, существующие в структуре в отсутствие пучка.

В случае малой плотности пучка $\lambda_1 d_1 \ll 1$; $\lambda_2 d_2 \ll 1$ уравнение (6) преобразуется к виду:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = 1 - \frac{\omega_0^2 d^2}{2v_0^2 \varepsilon_{zz}}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{zz}(\omega) = d\varepsilon_1 \varepsilon_2 / (d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1)$ – компонента тензора диэлектрической проницаемости мелкодисперсной среды.

В случае слабой пространственной дисперсии $\frac{\omega d}{v_0} \ll 1$; $kd \ll 1$ из выражения (7) получим:

$$\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)^2 = \frac{\omega_0^2}{v_0^2 \varepsilon_{zz}}. \quad (8)$$

Закон дисперсии колебаний имеет тот же вид, что и в однородной среде, диэлектрическая проницаемость которой равна $\varepsilon_{zz}(\omega, d_1, d_2)$. Из выражения

(8) в приближении малой плотности пучка полагая получим:

$$\Delta\omega^2 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_{zz}(\omega = kv_0)}; \quad \Delta\omega \ll kv_0. \quad (9)$$

В этом случае возникают колебания с частотой, определяемой временем пролета τ частицей пространственного периода структуры $\tau = \frac{d}{v_0}$. Целое число l равно отношению времени пролета к периоду колебаний

Инкремент неустойчивости равен:

$$\text{Im} \Delta\omega = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{\omega_0^2 \omega_{p1} d_1}{2\varepsilon_{01} d} \right)^{\frac{1}{3}}$$

где $\omega_{p1} = \frac{\omega_{01}}{\sqrt{\varepsilon_{01}}}$.

Если $\omega = kv_0$ то мы имеем неустойчивость в условиях черенковского резонанса с инкрементом, который в $(d_1/d_2)^{\frac{1}{3}}$ раз меньше чем в однородной плазме. В случае $\omega_p = \frac{2\pi v_0}{d} l$ неустойчивость связана с черенковским параметрическим излучением заряженной частицы.

Из выражения (8) следует, что неустойчивость возникает также при условии когда ε_{zz} является комплексной величиной и $\text{Re} \varepsilon_{zz} > 0$.

Исследуемая модель взаимодействия наведенных токов и колебаний в полупроводниковых комплектоующих ЭРИ является достаточно универсальной и позволяет рассмотреть ряд частных случаев наиболее интересных при проведении экспериментов по определению критериев стойкости в области обратимых отказов.

Колебания становятся неустойчивыми при условии $\varepsilon_{zz} < 0$ ($\Delta\omega^2 < 0$), то есть диэлектрическая проницаемость хотя бы одного из слоев должна обладать частотной дисперсией и быть отрицательной.

Пусть $\varepsilon_2 > 0$, $\varepsilon_1 < 0$. Тогда из формул (8) – (9) следует:

$$\Delta\omega^3 = \frac{\omega_0^2 \omega_{p1} d_1}{2\varepsilon_{01} d}. \quad (10)$$

Выводы. Приведенные количественные оценки инкремента неустойчивостей показывают, что величина энергии излучения лежит в пределах чувств-

вительности современных приемников излучения субмиллиметрового диапазона

Предложена модель взаимодействия наведенных внешним ЭМИ токов с электростатическими колебаниями полупроводниковой сверхрешетки, основанная на реализации резонансного (черенковского) взаимодействия движущихся зарядов и электромагнитных колебаний в условиях, когда совпадают фазовая скорость волны и скорость заряженной частицы.

Получены расчетные соотношения, связывающие величину инкремента неустойчивостей с величиной наведенных токов и параметрами МДП – структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, размерами структуры.

Список литературы: 1. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А.* Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М., Вюраль Б.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М.* Электромагнитные явления СВЧ-диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Myrova L.O., Chepizhenko A.Z.* Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jelektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 Print. 2. *Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A.* Jelektromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz', 1979. 225 Print. 3. *Stil M., Vjural' B.* Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 Print. 4. *Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M.* Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. Kiev: Naukova dumka, 1991. 216 Print. 5. *Zi C.* Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir, 1984. 456 Print.

Поступила (received) 02.04.2015

Н. С. НАЗАРОВА, канд. техн. наук, доцент, ст. наук. співр., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв;

Д. В. ВІННИЧЕНКО, мол. наук. співр., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв;

І. Л. ВІННИЧЕНКО, аспірант, Національний університет кораблебудування імені адм. Макарова, Миколаїв;

Ю. О. АДАМЧУК, інженер, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв

ІЄРАРХІЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПОТОЧНОГО СТАНУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ

Проведено аналіз задач контролю процесів в розрядному контурі генератора імпульсних струмів для розрядноімпульсних технологій. Обґрунтовано створення системи моніторингу поточного стану генератора на принципах модульності, ієрархічності, використання колективних ресурсів і потужної обчислювальної системи реального часу. Розроблено схемну реалізацію системи моніторингу на базі розробленого промислового контролера і проведено її випробування на експериментальній установці для розрядноімпульсної технології виготовлення буронабивних свай.

Ключові слова: ієрархична система моніторингу, генератор імпульсних струмів, розрядноімпульсні технології.

Основним елементом розрядноімпульсних технологічних установок є генератор імпульсних струмів (ГІС). В розрядне коло ГІС вмикається технологічне навантаження, яке зазвичай являє собою канал розряду, що формується у суцільному конденсованому середовищі (воді). Розрядний канал використовується як джерело імпульсного тиску на об'єкт обробки. Ефективність розрядноімпульсних технологій у значній мірі залежить від характеру розряду накопичувача енергії, та амплітуди розрядного струму. Характер зміни струму в процесі розряду несе інформацію про перебіг електровибухового технологічного процесу, наприклад, дозволяє виявляти аварійні ситуації (коротке замикання) або випадки розряду конденсатора з малими струмами, при яких вся енергія втрачається (холості розряди). Тому розрядний струм є координатою вектору стану ГІС, а характеристики розрядного струму (форму, амплітуду, тривалість, декремент затухання) можна використовувати як інформаційні величини (інформаційні координати вихідного вектора об'єкта спостереження), що викликає підвищення вимог до системи вимірювання розрядного струму для забезпечення заданого ступеня точності. Досвід використання амплітуди розрядного струму в якості інформаційної координати [1, 2, 3] в системах керування розрядноімпульсних установок підтверджує надійність цього методу контролю технологічного процесу. З іншого боку роз-

виток апаратних і програмних засобів дозволяє створювати складні інформаційно-керуючі системи для керування технологічними процесами. Але впровадження таких систем для розрядноімпульсних технологій стримується такими факторами як великі імпульсні струми в електричних колах установок та наведені електромагнітні поля з великою густиною енергії.

Метою досліджень є обґрунтування принципів створення і розробка ієрархічної системи моніторингу поточного стану генераторів імпульсних струмів для контролю технологічного процесу і захисту електрообладнання від аварійних режимів.

Матеріали дослідження. Результати попередніх досліджень [4] обґрунтовують можливість підвищення енергоефективності розрядноімпульсних технологій при застосуванні оптимальної системи керування, побудованої за критерієм мінімізації функції втрат. При цьому інформаційна координата вектору поточного стану ГІС містить максимальне значення розрядного струму i_m .

Для визначення типових значень розрядних струмів і швидкості їх зміни проаналізовано параметри ГІС для ряду розрядноімпульсних технологій (табл. 1). Накопичувач енергії ГІС має діапазон робочих напруг від 5 до 50 кВ та ємностей C від 0,01 до 5600 мкФ. Для кожної технологічної установки також можна оцінити і виміряти індуктивність розрядного контуру ГІС, яка зазвичай дорівнює одиницям мікрогенрі, але може бути меншою або більшою.

Таблиця 1 – Параметри ГІС для ряду розрядноімпульсних технологій

Назва технології	U_c , кВ	C , мкФ	L , мкГн	$I_{mag, max}$, кА	t_{rise} , мкс	W_{max} , кДж
Запресовка труб [1]	30-50	8-16	6-8	81	15	10
Електрогідравлічна обробка розплавів металів [5]	≤ 50	0,25-4	2-4	70	4,5	1,5
Обробка свердловин (вода) [6]	30	2,5	4-5	24	5	1,1
Обробка свердловин (нафта) [7]	30	2,1	0,7	33	3,5	1,2
Штамповка [8, 9]	10-50	10-42	3,5-15	170	19	52
Електрогідравлічна очистка виливків [10]	≤ 50	2-4	10-20	32	10	2,5-5
Руйнування гранітних негабаритів [11]	5-25	5600	7-14	141	311	70

Максимальний струм у навантаженні визначається коливальним, або аперіодичним характером розряду і амплітудою струму I_{mag}

$$I_{mag} = \frac{U_c}{\sqrt{L/C}} = \sqrt{\frac{2W}{L}}, \quad (1)$$

де U_c – напруга на конденсаторі; W – енергія накопичувача, L – індуктивність розрядного контуру.

Характерний час наростання струму від 0 до максимального значення (при коливальному режимі розряду) можна оцінити за формулою

$$t_{rise} \approx \pi \frac{\sqrt{LC}}{2}. \quad (2)$$

Значення максимальної амплітуди струму і відповідного йому часу наростання струму, які розраховані за (1), (2) і наведені в табл. 1, обумовлюють вибір датчика струму, для якого діапазон струмів має порядок від 10^2 до 10^5 ампер, та час зростання від 1 мкс до 1 мс.

Взагалі існує декілька методів вимірювання струму, а саме: за допомогою резистивного шунта, трансформатора струму, датчика на основі ефекту Холла, магніторезистивного датчика, магнітооптичного датчика, пояса Роговського. Пояс (котушка) Роговського має наступні переваги: невелика вартість, немає обмежень по насиченості, невелика споживана потужність, дуже низька температурна залежність, несприйнятливості до зміщення по постійному струму, але ж є і деякі недоліки, а саме: вихідний сигнал потребує використання апаратного інтегратора та наявності чутливості до зовнішніх магнітних полів. Для струмів порядку десятків - сотень кілоампер, з напругами на ділянках розрядного кола до 50 кВ і наявністю наведених в багатоканальній розрядноімпульсній системі електромагнітних полів з великою густиною енергії найбільш доцільним є використання датчиків струму на основі пояса Роговського.

Напруга на виході пояса Роговського пропорційна похідній струму, тому для отримання розрядного струму до виходу пояса приєднують активний або пасивний інтегратор. Для інтегрування на низьких частотах (десятки – сотні герц) та невеликих струмів (10^{-2} – 10^2 А) використовуються активні інтегратори на основі операційних підсилювачів, розрахунок яких описано, наприклад, в [12].

Задачі моніторингу поточного стану ГІС. За величиною струму можна виявити характер розрядного процесу ГІС та чи задовольняє цей характер технології, чи є аварійним або холостим.

Особливістю розрядних електричних характеристик ГІС з міжелектродним проміжком, заповненим водою (далі - технологічне навантаження), є їх випадковий характер, зумовлений випадковими процесами формування каналу розряду. Тому для аналізу стану ГІС використовують ймовірнісні величини: середнє значення максимального розрядного струму $i_m[n]$ і середньоквадратичне відхилення σ_i , визначені на кількості випадків n .

Для електророзрядних технологій можна виділити три режими роботи ГІС:

– номінальний режим, який супроводжується електровибуховим формуванням каналу розряду. Цей режим характеризується струмом в діапазоні

$$i_{mr}[n] - k\sigma_i \leq i_m \leq i_{mr}[n] + k\sigma_i, \quad (3)$$

де $i_{mr}[n]$ – середнє значення номінального максимального розрядного струму; k – множник, значення якого вибирають із інтервалу від 1 до 3 в залежності від обраного рівня достовірності;

– режим короткого замикання, при якому струм буде протікати в розрядному колі ГІС, але мине технологічне навантаження. Цей режим характеризується струмом

$$i_{msc} = I_{mag} e^{-2R\sqrt{L/C}} = \frac{U_0}{\sqrt{L/C}} e^{-2R\sqrt{L/C}}, \quad (4)$$

де U_0 – напруга на ємнісному накопичувачі ГІС з ємністю C ; L, R – індуктивність і активний опір розрядного контуру; I_{mag} – амплітуда відповідного коливального розряду;

– режим холостих розрядів, при якому не виконується корисна робота і вся енергія ємнісного накопичувача ГІС переходить у витрати. При цьому ємнісний накопичувач розряджається через технологічне навантаження, але характеризується значно меншим максимальним значенням розрядного струму

$$i_{moc}[n] - k\sigma_i \leq i_m \leq i_{moc}[n] + k\sigma_i, \quad (5)$$

де $i_{moc}[n]$ – середнє значення максимального розрядного струму холостих розрядів.

Відповідно до [2] для різних параметрів технологічного навантаження струм $i_{mr}[n]$ знаходиться в діапазоні від $0,4I_{mag}$ до $0,7I_{mag}$, а $i_{moc}[n]$ – в діапазоні від $0,1I_{mag}$ до $0,3I_{mag}$.

Для технологій, в яких використовується фіксований міжелектродний проміжок, режим короткого замикання є аварійним, а для технологій із рухомих електродом – небажаним робочим. Тобто в першому випадку система керування повинна відключити ГІС, а в іншому – діяти відповідно до обраного закону керування.

Практично для всіх технологій режим холостих розрядів є небажаним, тому при холостих розрядах система керування повинна виконати визначені процедури, а якщо вони не призведуть до бажаного результату, то відключити ГІС.

Крім того, для більшості технологій розрядноімпульсна обробка повинна бути багатократною [1, 5, 10]. Тому необхідно виконувати контроль кількості імпульсів із номінальним розрядним струмом і кількості холостих розрядів.

Відповідно до вищесказаного задачі моніторингу поточного стану ГІС для розрядноімпульсних технологій можуть відрізнятися, але для всіх техно-

логії можна виділити типи задач, що є загальними. До них відносяться вимірювання максимального значення розрядного струму, визначення середнього значення з використанням адаптивного інформаційного фільтру [13], тобто, обробка інформації за алгоритмами різної складності, визначення режиму розряду ГС, зберігання історії станів ГС і їх аналіз, формування сигналів керування і індикації поточного стану ГС.

Розробка структур систем для типових задач процесу моніторингу стану ГС. Спрощений алгоритм контролю розрядного струму можна описати наступним чином. Провівши попередній аналіз розрядноімпульсного процесу, визначають струм короткого замикання і діапазон значень струму, при якому відбувається пробій міжелектродного проміжку, тобто номінальне значення струму, необхідного для конкретної технології. Ці значення струму записуються в пристрій обробки, після чого цей струм порівнюється з отриманим поточним значенням струму, яке надходить з системи вимірювання і нормується за допомогою адаптивного інформаційного фільтру. Потім сигнал перетворюється в цифровий код і вводиться в цифровий обчислювальний пристрій, в якому виконується накопичення, збереження та обробка інформації. На основі результату порівняння робиться висновок про поточний стан ГС, тобто про режим роботи генератора.

З метою зниження вимог до швидкодії АЦП в систему доцільно ввести пристрій пам'яті з каналом її відновлення. Також потрібно, щоб система містила блок обробки та накопичення інформації, блок індикації. Тому модуль для вимірювання параметрів імпульсів струму повинен мати структуру, показану за допомогою блок-схеми на рис. 1.



Рисунок 1 – Блок-схема системи вимірювання параметрів імпульсів струму

Кількість імпульсів є важливим параметром. Він необхідний у випадках, коли кількість розрядів відіграє важливу роль. Лічильник повинен підраховувати лише ті розряди, струм яких є номінальним для даної технології. За цим показником можна виявити кількість продуктивних розрядів і визначити яку кількість розрядів необхідно виконати додатково на даному етапі обробки. Також частота слідування імпульсів є показником цілісності електрообладнання ГС. За допомогою даних з лічильника імпульсів після деяких перетворень можна отримати частоту, або на базі лічильника імпульсів побудувати частотомір.

Оскільки показником нормального режиму роботи є струм, то доцільно

використовувати для побудови лічильника імпульсів датчик струму.

На основі використання датчика струму запропоновано структуру модуля для реєстрації кількості імпульсів струму, яку показано за допомогою блок-схеми на рис. 2.



Рисунок 2 – Блок-схема системи підрахунку кількості продуктивних імпульсів

Обов'язковою функцією системи моніторингу є захисна, яка забезпечує відключення електрообладнання ГІС у разі досягнення розрядним струмом значення короткого замикання. На рис. 3 зображена блок-схема системи струмового захисту.

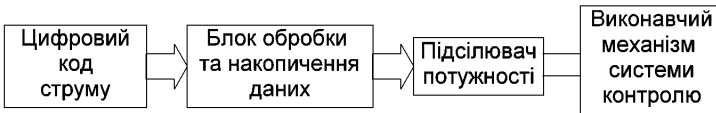


Рисунок 3 – Блок-схема системи струмового захисту

Таким чином, система моніторингу повина складатися щонайменше з трьох автоматичних систем: модуля для вимірювання параметрів імпульсів струму, модуля лічильника імпульсів та системи струмового захисту. В розглянутих системах використовуються однакові датчики, присутні блоки обробки і накопичення даних, аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі, використовується цифрова обробка інформації. Системи можна реалізувати у виді аналогових пристроїв, або комбінованих – аналого-цифрових пристроїв на мікросхемах дискретної логіки. Недоліком такої реалізації є завдання дотримання жорсткої логіки роботи системи. Для уніфікації системи моніторингу поточного стану ГІС доцільно користуватися принципами модульності, ієрархічності і використання колективних ресурсів на базі потужної обчислювальної системи реального часу, інакше система буде громіздкою, складатися з великої кількості окремих підсистем і тому ненадійною.

На основі перерахованих принципів запропоновано структуру ієрархічної системи моніторингу поточного стану ГІС (рис. 4).

Складна структура системи моніторингу може бути реалізована на базі програмованого мікроконтролера. Перевагами такої реалізації є:

- відносно невеликі масо-габаритні показники;
- висока надійність;
- можливість змінювати параметри вимірювання і контролю не втручаючись в апаратну частину системи, а змінюючи лише програмний код;
- велика обчислювальна потужність сучасних мікроконтролерів дає мо-

жливість реалізації декількох систем на одній мікросхемі.

Обчислювальні можливості сучасних мікроконтролерів настільки великі, що використання окремого контролера для кожної системи стає недоцільним. Тому на базі одного контролера можливо розробити систему у цілому.



Рисунок 4 – Структура ієрархічної системи моніторингу поточного стану ГС

Схемні рішення ієрархічної системи моніторингу стану ГС. Ієрархічну систему моніторингу поточного стану ГС розроблено у виді програмованого промислового контролера (рис. 5) з пристроями вводу аналогової інформації і пристроями виводу керуючих сигналів заданої потужності.

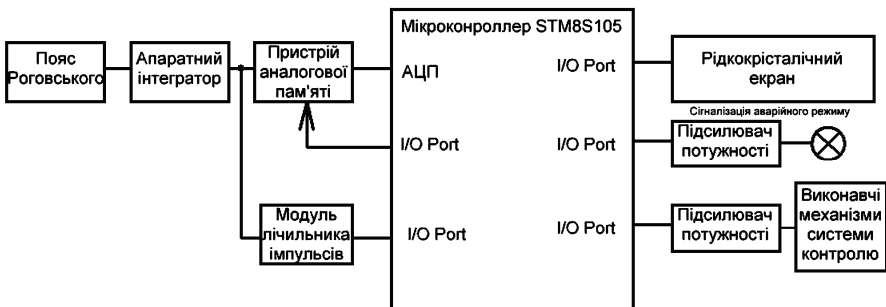


Рисунок 5 – Апаратна реалізація системи моніторингу поточного стану ГС

Для забезпечення вимог кожної з розглянутих систем обрано мікроконтролер STM8S105.

Мікроконтролер оснащений 16 МГц сучасним ядром STM8 Гарвардської архітектури та 3х-ступеневим конвеєром, має 32 Kb Flashпам'яті програм, та 2 Kb оперативної пам'яті. Мікроконтролер має діапазон живлення від 2,95 В до 5,5 В. У контролері реалізовано чотири джерела тактового сигналу: низько потужний резонансний генератор, можливість підключення зовнішнього генератора частоти, внутрішній 16 MHz RC генератор та вбудований малопотужний 128 kHz RC генератор. Вбудований контролер внутрішніх переривань на 32 переривання, та 37 зовнішніх переривань на 6 векторів. З боку периферії контролер оснащений інтерфейсом UART (використовується для синхронізації декількох приладів та передачі даних), IrDA, LIN, SPI (зі швидкістю до 8 Mb/c) та I²C (швидкість до 400 Kb/c). Також контролер оснащений десятибітовим АЦП та 38 портами вводу-виводу. В мікросхемі реалізовано лічильник зовнішніх переривань, на базі якого був розроблений лічильник імпульсів.

При розробці схемних рішень системи моніторингу поточного стану ГІС ураховано такі особливості розрядноїмпульсних технологій як великі імпульсні струми в електричних колах установок та наведені електромагнітні поля з великою густиною енергії. Розроблено схемні рішення, що дозволяють гарантувати надійну роботу системи контролю розрядного струму і реагування на аварійні ситуації. Моделювання роботи ГІС на різноімпедансне навантаження показує збіг значень розрядного струму і сигналу на виході інтегратора з точністю до 2 %.

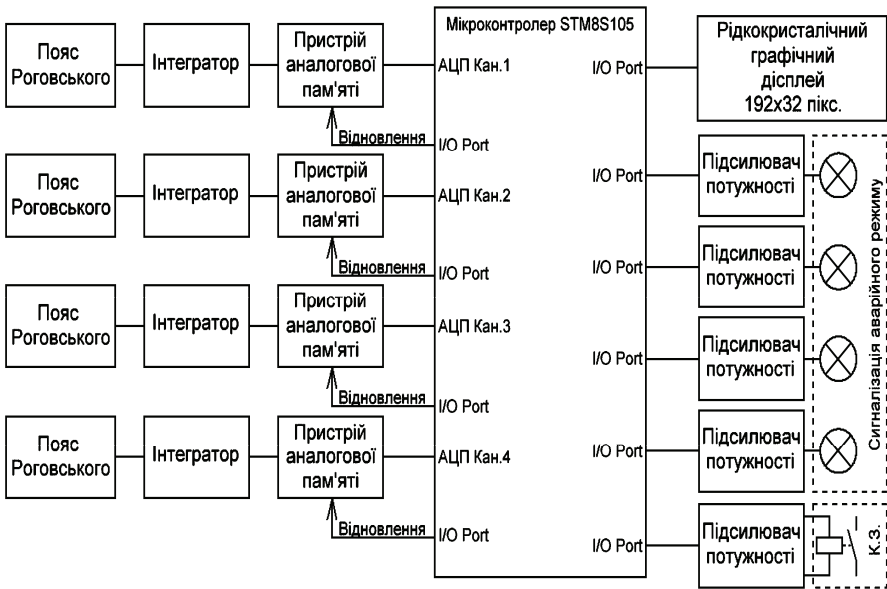


Рисунок 6 – Блок-схема пристрою струмового захисту чотирьохканального ГІС

На рис. 6 наведено блок-схему системи моніторингу чотирьохканального ГС від короткого замикання в будь-якому каналі. В інформаційній системі виводиться на дисплей і накопичується інформація про кількість розрядів з номінальним струмом і струмом з величиною меншою ніж допускається для технології. Це дозволяє відкоригувати режим обробки для досягнення бажаного технологічного ефекту.

Розроблено систему моніторингу чотирьохканального ГС, що містить систему збору, накопичення та обробки інформації про розрядні струми, що протікають одночасно або з часовим розбігом у кожному розрядному каналі, і автоматичну систему захисту генератора від режиму короткого замикання у навантаженні (рис. 7). Пристрій пройшов випробування на експериментальній установці для розрядноімпульсної технології буронабивних свай.



а

Кан	1	2	3	4
Ток	37	37	42	32
Имп	2	2	2	2
Хол	0	0	0	0
Кан	1	2	3	4
Ток	33	41	44	40
Имп	4	4	4	4
Хол	0	0	0	0
Кан	1	2	3	4
Ток	40	38	41	42
Имп	5	5	5	5
Хол	0	0	0	0

б

Рисунок 7 – Зовнішній вигляд пристрою системи моніторингу поточного стану ГС: а – система моніторингу із функцією струмового захисту; б – результати вимірювання розрядного струму і кількості зарахованих імпульсів в кожному з чотирьох каналів розряду при випробуваннях пристрою

Висновки. Проведено аналіз задач контролю процесів в розрядному контурі ГС для розрядноімпульсних технологій з використанням у якості інформаційних координат параметрів імпульсів розрядного струму. За результатами аналізу сформульовано принципи створення системи моніторингу поточного стану ГС: модульності, ієрархічності і використання колективних ресурсів на базі потужної обчислювальної системи реального часу. Розроблена система із запропонованою структурою дозволяє в режимі реального часу реагувати на коротке замикання в навантаженні і контролювати технологічний процес. Випробування системи на експериментальній установці для розрядноімпульсної технології буронабивних свай підтвердили її надійну роботу. Розроблена система моніторингу поточного стану ГС може використовувати

ватись в системах керування розрядноімпульсних технологій в умовах великих імпульсних струмів в електричних колах установок, та наведених електромагнітних полях з великою густиною енергії.

Список літератури. 1. *Гулий Г.А.* Основы разрядноимпульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 2. *Назарова Н.С.* Анализ статистической эффективности координат выходного вектора объекта управления // Збірник наукових праць Українського державного морського технічного університету. – 2001. – № 1 (373). – С. 130-137. 3. Пат. 83379 Україна МПК7 G05B13/02. Спосіб автоматичного регулювання електроімпульсних установок та система для його здійснення / *О.І.Вовченко, С.С.Козырев, Н.С.Назарова*; заявник і патентовласник ІПТ НАН України. – № а 2006 033307; заявл. 27.03.06; опубл. 10.07.08, Бюл. № 13. 4. *Назарова Н.С., Дюрдійчук В.В.* Методи підвищення енергоефективності розрядноімпульсної технології очищення виливків // Технічна електродинаміка. – 2011. – №5. – С. 68-73. 5. *Грабовий В.М.* Наукові і технологічні основи електродімоімпульсної дії на структуру та властивості виливків із сплавів на основі заліза і алюмінію. Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук. – К.: 2007. – 40 с. 6. Електророзрядний спосіб відновлення продуктивності артезіанських свердловин / *І.С. Швець* та ін. // Вісник аграрної науки Причорномор'я: наук. журн. – Миколаїв: Миколаївський нац. аграрн. універ. 2013. – Вип. 3. – С. 200-205. 7. Анализ эффективности промышленного применения способа электроразрядного воздействия на призабойную зону скважины с целью интенсификации притока нефти / *А. П. Смирнов* и др. // Геотехнічна механіка. Міжвід зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: «НОУЛІДЖ», 2014. – Вип. 114. – С. 132-141. 8. *Косенков В.М.* Влияние способа деформирования листовых алюминиевых сплавов на увеличение пластических деформаций // Письма о материалах. – 2014. – Т. 4, № 1. – С. 18-21. 9. *Косенков В.М.* Использование круглых мембран для определения механического КПД электрического разряда в воде // ЭОМ. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 81-90. 10. *Денисюк Т.Д., Голень Ю.В.* Особенности электроразрядной очистки точного литья // Процессы литья. – 2014. – № 1. – С. 62-68. 11. *Ризун А.Р., Голень И.В., Денисюк Т.Д.* Технологічний процес та обладнання для електроіонно-локального знеміцнення ґрунтів різної міцності і структури // Наука та інновації. – 2014. – № 5. – С. 18-23. 12. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1982. – 512 с. 13. *Назарова Н.С., Козырев С.С.* Разработка адаптивного фильтра информационного сигнала системы управления электрогидроимпульсной установки // Збірник наукових праць НУК. – 2004. – № 4 (397). – С. 124-130.

Bibliography (transliterated): 1. Gulyj G.A. Osnovy razrjadnoimpul'snyh tehnologij. Kyjiv: Naukova dumka, 1990. 208 Print. 2. Nazarova N.S. Analiz statisticheskoj jeffektivnosti koordinat vyhodnogo vektora ob'ekta upravlenija Zbirny'k naukovy'x prac' Ukrayins'kogo derzhavnogo mors'kogo texnichnogo univerty'setu. 2001. No 1 (373). P. 130-137 Print. 3. Pat. 83379 Ukrayina MPK7 G05B13/02. Sposib avtomaty'chnogo reguljuvannya elektroimpul'sny'x ustanovok ta sy'stema dlya jogo zdjysnennja. O.I.Vovchenko, S.S.Kozy'ryev, N.S.Nazarova; zayavny'k i patentovlasny'k IIPТ NАN Ukrayiny'. No a 2006 033307; zayavl. 27.03.06; opubl. 10.07.08, Byul. No 13 Print. 4. Nazarova N.S., Diordijchuk V.V. Metody' pidvy'shennja energoeffekty'vnosti rozrjadnoimpul'snoyi tehnologiyi ochy'shennja vy'ly'vkviv. Texnichna elektrody'namika. 2011. No 5. 68-73 Print. 5. Grabovy'j V.M. Naukovi i tehnologichni osnovy' elektrgidroimpul'snoyi diyi na strukturu ta vlasty'vosti vy'ly'vkviv iz splaviv na osnovi zaliza i aluminizyu. Avtoref. dy's. na zdobuttya nauk. stupenja d-ra texn. nauk. Ky'jiv, 2007. 40 Print. 6. Elektрorozrjadny'j sposib vidnovlennja produkty'vnosti artezjans'ky'x sverdlovyn. I.S. Shvecz' ta in. Visny'k agrarnoyi nauky' Pry'chornomor'ja: nauk. zhurn. My'kolayiv: My'kolajivs'ky'j nacj. agrarn. univer, 2013. Vol. 3. 200-205 Print. 7. Analiz jeffektivnosti promyshlennogo primenenija sposoba jelektрorazrjadnogo vozdejstvija na prizabojnuju zonu skvazhiny s cel'ju intensifikacij prитока nefти. A. P. Smirnov i dr. Geotexnichna mehanika. Mizhvid zb. nauk. prac'. Dnipropetrovs'k: "NOULIDZh", 2014. Vol. 114. - 132-141 Print. 8. Kosenkov V.M. Vlijanie sposoba deformovanija listovyh aljuminievyh splavov na uvelichenie plasticheskikh deformacij. Pis'ma o materialah. 2014. Vol. 4. No 1. 18-21 Print. 9. Kosenkov V.M. Ispol'zovanie kruglyh membran dlja opredelenija mehani-

cheskogo KPD jelektricheskogo razrjada v vode. JeOM. 2014. Vol. 50, No 2. 81-90 Print. **10.** Denisjuk T.D., Golen' Ju.V. Osobennosti jelektrorazrjadnoj ochistki tochnogo lit'ja. Processy lit'ja. 2014. No 1. 62-68 Print. **11.** Ry'zun A.R., Golen' Y'.V., Deny'syuk T.D. Teknologichny'j proces ta obladnannya dlya jelektrorazryadnogo lokal'nogo znemichnennya gruntiv riznoyi micznosti i struktury'. Nauka ta innovaciyi. 2014. No 5. 18-23 Print. **12.** Titce U., Shenk K. Poluprovodnikovaja shemotehnika. Moscow: Mir, 1982. 512 Print. **13.** Nazarova N.S., Kozyrev S.S. Razrabotka adaptivnogo fil'tra informacionnogo signala sistemy upravlenija jelektrogridroimpul'snoj ustanovki. Zbirny'k naukovy'x prac' NUK. 2004. No 4 (397). 124-130 Print.

Поступила (received) 17.03.2015.

УДК 621.317.3

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

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ БАО К ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ, ВЫЗВАННЫХ МОЛНИЕЙ «ИГЛА-МКУ-4» («МНОГОКРАТНЫЕ УДАРЫ» ФОРМА 4)

Описана конструкция и результаты аттестации генератора, предназначенного для испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией «многократные удары» форма 4, в соответствии с требованиями международного стандарта DO-160 (раздел 22). Генератор воспроизводит циклограммы импульсов напряжения формы 4 по 5-ти уровням испытаний. Испытания проводятся методом «кабельной инъекции».

Ключевые слова: испытание, бортовое оборудование, невосприимчивость, молния, переходные процессы, генератор, аттестация.

Введение. В настоящее время обязательным видом испытаний бортового авиационного электротехнического и электронного оборудования (БАО) летательных аппаратов являются испытания на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией. Эти процессы возникают при прямом ударе молнии в корпус летательного аппарата и последующем растекании токов молнии по различным металлическим узлам этих аппаратов, в частности, по межблочным линиям связи (МЛС).

Высокая поражающая эффективность токов растекания объясняется тем,

© Ю.С.Немченко, В.В.Князев, И.П.Лесной, С.Б.Сомхиев, 2015

что при этом в МЛС возникают различного вида наведенные высокие импульсные напряжения и большие токи, представляющие собой серьезную угрозу для современной слаботочной электроники БАО.

Поэтому, стойкость к переходным процессам, вызванным молнией, выделена в отдельный вид испытаний, который регламентируется нормативным документом [1]. В Украине, в настоящий момент, действует устаревшая версия этого стандарта [2], которая с 2004 года распространяется на все типы БАО гражданских самолетов и вертолетов.

В данной статье рассмотрены испытания вида «многократные удары», реализуемые методом введения в заземление. Этот метод используется для проверки способности самолетного оборудования выдерживать внутренние электромагнитные эффекты, создаваемые внешним воздействием молний без функциональных отказов и повреждений.

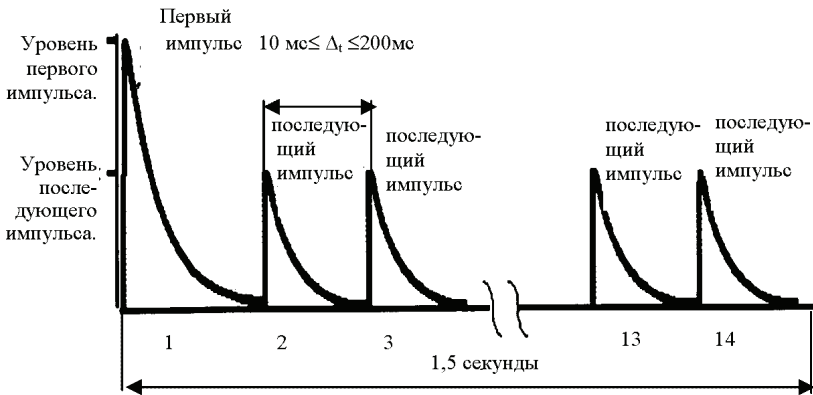
Концептуальная схема формирования импульсов напряжения и тока требуемой формы приведена в [3].

Таблица 1 – Требования к форме и амплитудно-временным параметрам (АВП) испытательных импульсов напряжения и тока

Параметр	Напряжение $U_{исп}$ (ф.4)	Ток $I_{пред}$ (ф.4)
1. Испытательный комплект № 4		Форма не нормирована
2. Уровни испытаний:		
– 1 (первый удар)	(25 + 5) В	$\leq (50 + 10) А$
– 1 (последующие удары)	(12,5 + 6,25) В	$\leq (25 + 12,5) А$
– 2 (первый удар)	(62,5 + 13) В	$\leq (125 + 25) А$
– 2 (последующие удары)	(31,25 + 15,626) В	$\leq (62,5 + 31,25) А$
– 3 (первый удар)	(150 + 30) В	$\leq (300 + 60) А$
– 3 (последующие удары)	(75 + 37,5) В	$\leq (150 + 75) А$
– 4 (первый удар)	(375 + 75) В	$\leq (750 + 150) А$
– 4 (последующие удары)	(187,5 + 93,75) В	$\leq (375 + 188) А$
– 5 (первый удар)	(800 + 160) В	$\leq (1600 + 320) А$
– 5 (последующие удары)	(400 + 200) В	$\leq (800 + 400) А$
3. Время нарастания, T_n , мкс	6,4 ± 1,28	не нормировано
4. Время спада, $T_{0,5}$, мкс	69 ± 13,8	не нормировано

Описание генератора. Генератор ИГЛА-МКУ-4 предназначен для проведения испытаний вида «многократные удары» методом «введения в заземление» БАО в полном объеме с требованиями НД [1, 2] испытательными импульсами напряжения и тока формы «4» обеих полярностей по пяти уровням испытаний. В табл. 1 приведены требования к форме и амплитудно-временным параметрам (АВП) испытательных импульсов напряжения и тока, которые с учетом допусков в полном объеме реализованы в генераторе ИГЛА-МКУ-4.

Генератор ИГЛА-МКУ-4 представляет собой высоковольтную электро-разрядную установку с программируемым таймером-коммутатором, которая генерирует многократные испытательные импульсы напряжений и тока положительной и отрицательной полярности по пяти уровням испытаний. Циклограмма вида «многократные удары» приведена на рис. 1.



Один первый импульс сопровождается тринадцатью последующими импульсами, распределенными в интервале до 1,5 секунды.

Рисунок 1 – Циклограмма испытательного пакета вида «многократные удары» формы 4. Временные параметры циклограммы: количество испытательных импульсов в испытательном пакете $N_{В1}$ – 14; интервал между испытательными импульсами в испытательном пакете $T_{В1}$ – от 10 мс до 200 мс; длительность испытательного пакета $T_{ВП}$ – до 1,5 с; количество испытательных пакетов $N_{ПП}$ – от 1 до 999.

Общий вид генератора ИГЛА-МКУ-4 приведен на рис. 2, а передняя панель генератора – на рис. 3.

Генератор ИГЛА-МКУ-4 собран в металлическом корпусе габаритами 480 x 215 x 450 мм. На передней панели генератора ИГЛА-МКУ-4 (рис. 3) расположены следующие органы управления и контроля:

– клавиша СЕТЬ с подсветкой служит для подачи напряжения питания 220 В 50 Гц на генератор ИГЛА-МКУ-4 и для его отключения после окончания работы;



Рисунок 2 – Общий вид генератора ИГЛА-МКУ-4



Рисунок 3 – Передняя панель генератора ИГЛА-МКУ-4

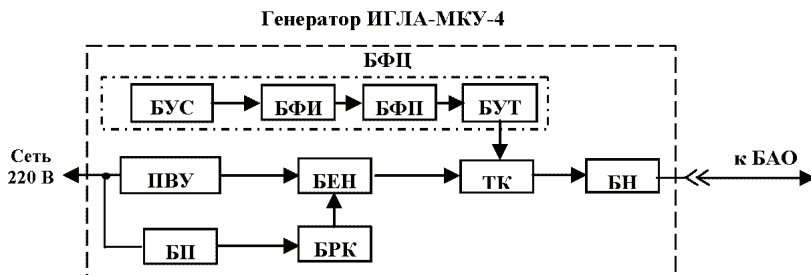


Рисунок 4 – Блок-схема генератора ИГЛА-МКУ-4:

БФЦ – блок формирования циклограммы испытательного импульса; БУС – блок управления и счетчик импульсов; БФИ – блок формирования временных интервалов; БФП – блок формирования цикла многократного удара; БУТ – блок управления тиристором; ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство; БЕН – блок емкостных накопителей; ТК – управляемый тиристорный коммутатор; БН – блок нагрузок; БРК – блок разряда накопительного конденсатора; БАО – бортовое авиационное оборудование; БП – блок питания БРК

- переключатель ИСПЫТ. УРОВЕНЬ служит для установления уровня испытательного напряжения генератора ИГЛА-МКУ-4 и имеет пять положений: «1», «2», «3», «4», «5»;
- переключатель ИНТЕРВАЛ, СЕК служит для установления временных интервалов в циклограмме между испытательными пакетами и имеет пять положений: «однократный», «10», «20», «40», «60»;
- табло КОЛИЧЕСТВО УДАРОВ служит для установления количества испытательных пакетов в заданной циклограмме многократных ударов;
- переключатель ПОЛЯРНОСТЬ служит для установления полярности выходного напряжения (положительной или отрицательной);
- кнопка СТАРТ служит для запуска генератора ИГЛА-МКУ-4;
- кнопка УСТАН. для установления количества испытательных пакетов (для уменьшения этого количества – пользоваться кнопкой СБРОС);
- кнопка СБРОС служит для остановки генератора ИГЛА-МКУ-4 и сброса ранее установленного количества испытательных пакетов до нуля;
- светодиод ИНД. ИМП служит для фиксации каждого импульса в испытательном пакете.



Рисунок 5 – Расположение элементов внутри корпуса генератора ИГЛА-МКУ-4

На задней панели генератора ИГЛА-МКУ-4 расположены следующие органы управления и контроля:

- клемма \perp служит для подключения генератора ИГЛА-МКУ-4 к контуру заземления;
- разъем СЕТЬ (~ 220 В) служит для подключения к генератору ИГЛА-МКУ-4 сетевого кабеля;
- «4А» и «4А» – предохранители;
- разъем ВЫХОД служит для подключения к генератору выходного кабеля и далее к испытуемому изделию;
- регулятор РЕГУЛИРОВКА $U_{зар}$ «меньше» - «больше» служит для ус-

тановки номинального значения $U_{зар}$ в зависимости от напряжения в сети электропитания.

Блок-схема генератора ИГЛА-МКУ-4 приведена на рис. 4.

Расположение элементов внутри корпуса генератора ИГЛА-МКУ-4 приведено на рис. 5 (вид сверху при открытой крышке).

Результаты аттестации генератора. На рис. 6 приведены осциллограммы выходных импульсов напряжения первого удара формы «4» положительной и отрицательной полярностей для 5 уровня испытаний.

На рис. 7 приведена циклограмма испытательного пакета вида «многоразовые удары» из 14 ударов общей длительностью 1,36 с.

Схема испытаний БАО с МЛС приведена на рис. 8.

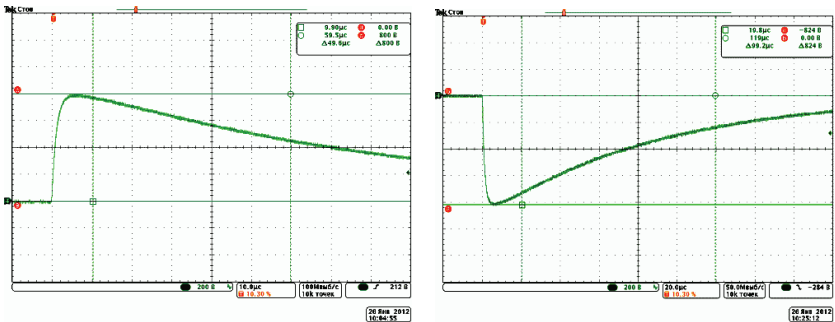


Рисунок 6 – Типовые осциллограммы выходных импульсов напряжения первого удара формы «4» 5 уровня положительной и отрицательной полярностей

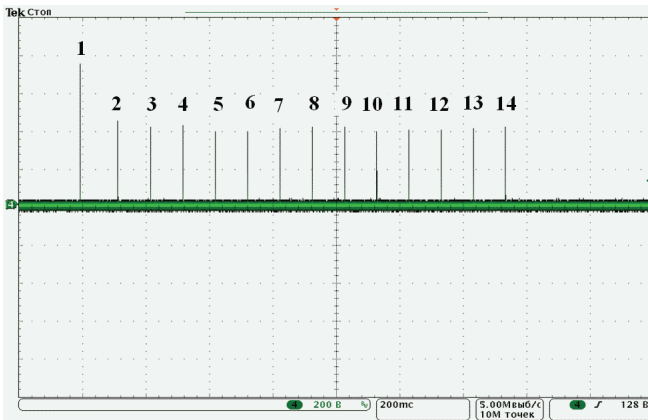


Рисунок 7 – Циклограмма испытательного пакета вида «многоразовые удары» из 14 ударов общей длительностью 1,36 с

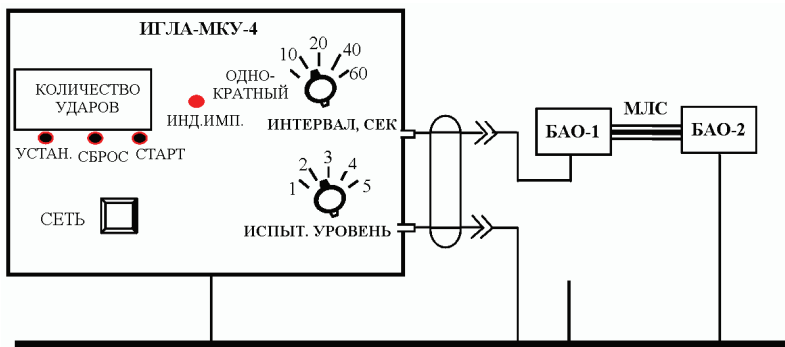


Рисунок 8 – Схема испытаний БАО: ИГЛА-МКУ-4 – испытательный генератор; МЛС – межблочная линия связи; БАО-1, БАО-2 – испытываемое оборудование

Выводы: Разработан и создан генератор ИГЛА-МКУ-4, который прошел первичную аттестацию с участием представителей ГП «Харьковстандартметрология». Программа и методика аттестации разработана в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». Генератор введен эксплуатацию и участвует в испытаниях БАО на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией методом «многократные удары».

Список литературы: 1. ED-14G:2011 Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. 2. КТ -160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 22.0 Восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией. / АР-МАК_2004. 3. Генератор для проведения испытаний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией («многократные удары») 4 формы ИГЛА-МКУ-4. Руководство по эксплуатации ИГЛА-МКУ-4.000.000.000 РЭ.

Bibliography (transliterated): 1. ED-14G:2011 Environmental conditions and test procedures for airborne equipment. 2. КТ-160D. Uslovija jekspluatacii i okruzhajushhej sredy dlja bortovogo aviacionnogo oborudovanija. (Vneshnie vozdejstvujushhie faktory – VVF). Trebovanija, normy i metody ispytanij. Razdel 22.0 Vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej. 3. Generator dlja provedenija ispytanij bortovogo aviacionnogo oborudovanija na vospriimchivost' k perehodnym processam, vyzvannym molniej («mnogokratnye udary») 4 formy IGLA-MKU-4. Rukovodstvo po jekspluatacii IGLA-MKU-4.000.000.000 Rje.

Поступила (received) 16.04.2015

Ю.С. НЕМЧЕНКО, гл. метролог, НИПКИ «Молния», НТУ «ХПИ»;
С.П. ШАЛАМОВ, студент, НТУ «ХПИ»

ИНДУКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ МОЛНИИ

В статье рассмотрены краткие теоретические сведения для выбора параметров сверхширокополосного измерителя напряженности магнитного поля индукционного типа. Представлены результаты реализации преобразователя для измерения биэкспоненциального импульса магнитного поля. Приведены параметры созданного преобразователя. Используя программу MicroCap, смоделирована работа преобразователя при воздействии на схему сигнала, параметры которого эквивалентны сгенерированному в системе колец Гельмгольца. Проведена калибровка преобразователя.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, электромагнитная индукция, биэкспоненциальный импульс, калибровка индукционного преобразователя, кольца Гельмгольца.

Введение. При исследованиях в области электромагнитных явлений, которые сопровождают молниевый разряд либо при решении задач экранирования, возникает необходимость измерять биэкспоненциальные импульсы магнитного поля (ИМП), имеющие параметры, описанные в [1]. Из-за того, что невозможно измерить одним преобразователем параметры широкополосного ИМП, которое, например, проникает внутрь экранированного объекта, так как при этом длительность импульса может значительно превышать величину, приведенную в [1], применяют независимые друг от друга преобразователи, параметры которых подбираются так, чтобы была возможность произвести измерения с минимальной погрешностью [2]. Удобнее анализировать измерения, когда имеется полная осциллограмма сигнала, а не две отдельные. Для получения полной картины сигнала на одной осциллограмме, необходимо предпринять ряд мер.

Выбор параметров преобразователя. Индукционный преобразователь (ИП) представляет собой магнитную (рамочную) антенну, помещенную в измеряемое магнитное поле. ЭДС, наводимая в ИП, в соответствии с законом электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного поля [3]:

$$e_d = -\mu_0 \mu_r s w \frac{dH}{dt} \cos \varphi, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость материала сердечника ИП; s – площадь рамки (m^2); w – количество витков рамки; φ –

угол между направлением вектора H и нормалью к рамке.

В соответствии с установленной терминологией, данное средство измерения называют измерителем напряженности магнитного поля (ИНМП).

Под чувствительностью ИП будем понимать отношения максимального напряжения, снимаемого с ИП к максимальной амплитуде измеряемого магнитного поля:

$$K_{.M} = \frac{U}{H_M} \cdot d. \quad (2)$$

Чувствительность ИП любого типа можно определить как [3]:

$$K_{.M} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S \cdot W \cdot \cos \varphi}{T_u}, \quad (3)$$

где T_u – постоянная интегрирования ИНМП.

Исходя из (3) чувствительность ИНМП с RC -интегратором будет низка. Это объясняется следующим:

а) для неискаженной передачи фронта ИП должен иметь малую величину времени нарастания переходной характеристики относительно фронта измеряемого импульса, что может быть выполнено лишь при малом значении параметра SW ;

б) для качественного интегрирования выходного сигнала ИП постоянная интегрирования должна быть очень большой.

Повышение уровня сигнала на выходе ИП можно осуществить, если производить измерения не одним ИНМП, а двумя - ИП фронта и ИП спада импульсов. При этом параметры ИНМП выбираются из условий

$$T_d \ll \frac{1}{\alpha}, \frac{1}{\beta}; \quad (4)$$

$$\frac{1}{\alpha} \geq T_u \gg \frac{1}{\beta}. \quad (5)$$

Условия (4) и (5) говорят о том, что ИП для измерения фронта должен иметь параметр SW , обеспечивающий неискаженную передачу фронта импульса, а интегратор должен иметь постоянную интегрирования в (30-50) раз больше, чем длительность фронта. Напряжение на выходе данного ИНМП практически совпадает по форме с измеряемым импульсом магнитного поля в интервале времен от 0 до t_{max} .

Параметры ИНМП для измерения спада (SW и T_u) выбираются из условий:

$$\frac{1}{\alpha} \gg T_d \geq \frac{1}{\beta}; \quad (6)$$

$$T_u \gg \frac{1}{\alpha}, \frac{1}{\beta}. \quad (7)$$

Напряжение на выходе таких измерителей практически совпадает по длительности с измеряемым импульсом.

Канал ИНМП измерения фронта (ИНМП-ВФ) построен по схеме ИНМП с RL-интегратором (элементы R1, L1), а канал ИНМП измерения длительности импульса (ИНМП-ВС) – по схеме с RC-интегратором (элементы L2, C1, R5) (Рис. 1). Особенности применения ИНМП с RL- и RC-интегратором приведены в [3].

Напряжение на выходе каналов ИНМП-ВФ и ИНМП-ВС имеют вид:

$$U_{\phi} = K_M^{\phi} (e^{-t/T_n^{\phi}} - e^{-\beta t}); \quad (8)$$

$$U_c = K_M^c (e^{-\alpha t} - e^{-t/T_n^c}), \quad (9)$$

где T_n^{ϕ} – постоянная интегрирования канала фронта; T_n^c – постоянная времени нарастания переходной характеристики канала длительности импульса.

Для суммирования сигналов с ИНМП-ВФ и ИНМП-ВС применяется схема, приведенная на рис. 1.

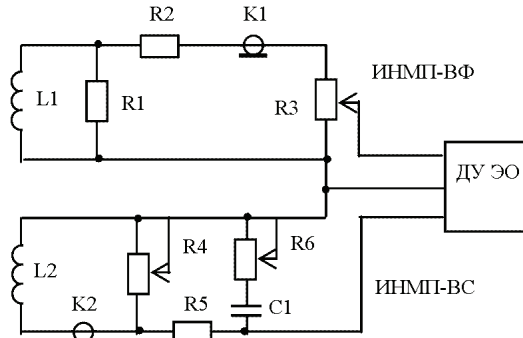


Рисунок 1 – Принципиальная схема ИНМП

Сумма обоих сигналов такова:

$$U_o = K_M^{\phi} e^{t/T_n^{\phi}} - K_M^{\phi} e^{-\beta t} + K_M^c e^{-\alpha t} + K_M^c e^{t/T_n^c}. \quad (10)$$

При выполнении условий:

$$T_n^{\phi} = T_n^c; \quad (11)$$

$$K_M^{\phi} = K_M^c; \quad (12)$$

$$U_o = K_M^{\phi} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \approx H(t). \quad (13)$$

Реализация условия (13) достигается:

- выполнением условия (11) регулировкой резистора R3;
- выполнением условия (10) регулировкой резистора R4.

Сложение сигналов U_{ϕ} и U_c производится в дифференциальном усилителе осциллографа (ДУ ЭО).

Из-за некоторого отличия формы сигналов U_ϕ и U_c от описанных уравнениями (8) и (9), в месте их стыка наблюдается небольшой провал, который устраняется при настройке измерителя корректирующим резистором R6 [4].

Созданные датчики имеют следующие параметры:

ИНМП-ВФ:

Диаметр витков – 75 мм; количество витков – 20; интегрирующее сопротивление – 1 Ом.

Датчик должен передавать практически без искажений фронт импульса, имеющий $\tau_{\phi(0,1-0,9)} = 100$ (нс).

ИНМП-ВС:

Диаметр витков – 75 мм; количество витков – 1000; интегрирующее сопротивление – 10 кОм; интегрирующая емкость – 0,3 мкФ.

Чувствительность ИНМП-ВС рассчитанная по формуле (2):

$$K_{\text{ИНМП-ВС}}^{\text{расчет}} = 1,85 \text{ (мВ/А/м)}.$$

Моделирование работы ИНМП. При помощи программы MicroCap построена схема, моделирующая работу широкополосного ИНМП. Схема замещения широкополосного ИНМП в MicroCap приведена на рис. 2.

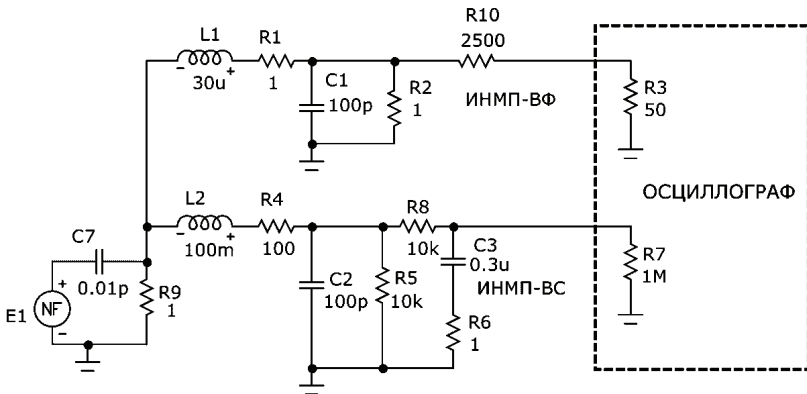


Рисунок 2 – Схема замещения широкополосного ИНМП в MicroCap

Источник E1 моделирует сигнал, который имеет фронт 300 (нс), а спад – 1,5 (мс). На вход преобразователя подается сигнал, который имеет вид:

$$U = A(\beta e^{-\beta t} - \alpha \cdot e^{-\alpha t}) \sim \frac{dH(t)}{dt}. \quad (14)$$

Сигнал источника E1 приведен на рис. 3 и 4.

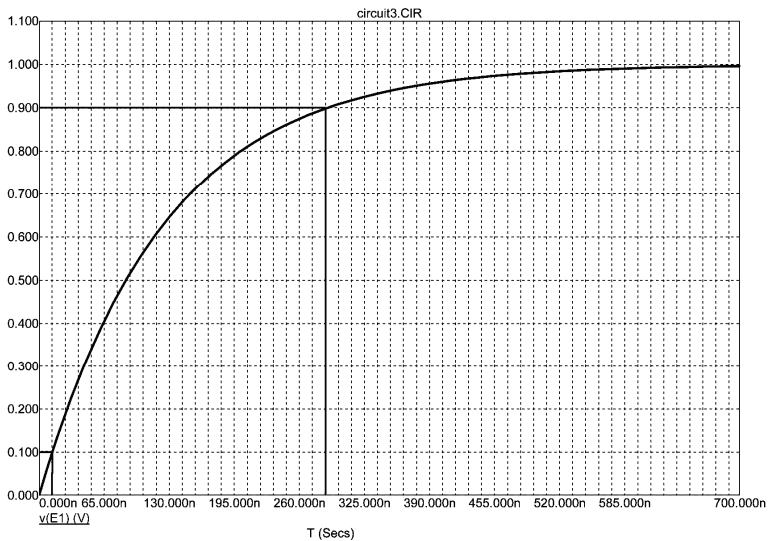


Рисунок 3 – Фронт измеряемого сигнала

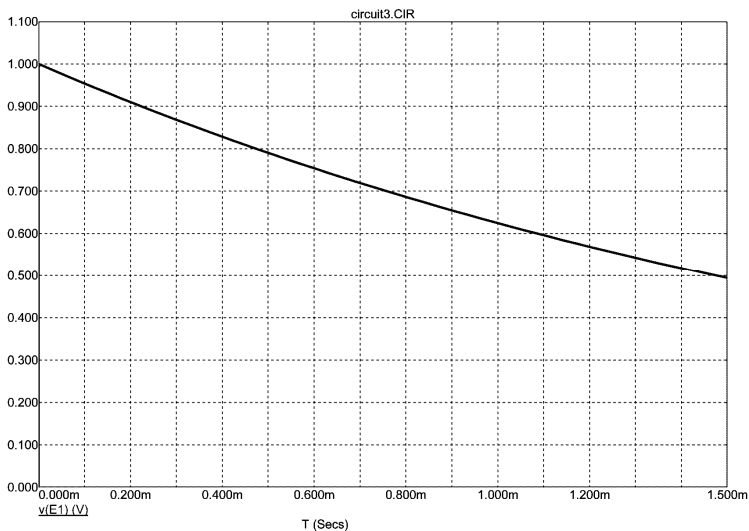


Рисунок 4 – Длительность спада измеряемого сигнала

Из рис. 3 видно, что фронт импульса на уровнях 0,1 и 0,9 относительно максимального значения имеет величину $T_{\Phi(0,1-0,9)} = 300$ нс.

Из рис. 4 определяется длительность импульса на уровне 0,5 от макси-

мального значения, составляющая $T_c = 1,5$ (мс).

Результаты моделирования процесса измерения напряженности магнитного поля приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что условия (11) и (12) выполнены, но спад передается с относительной погрешностью 58 %.

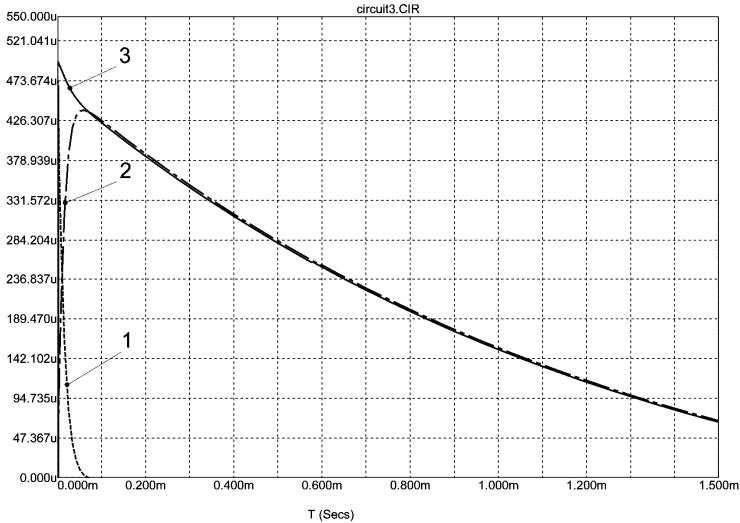


Рисунок 5 – Результаты моделирования: 1 - сигнал с ИНМП-ВФ; 2 - сигнал с ИНМП-ВС; 3 - сигнал после суммирования

Калибровка ИНПМ. Принципиальная схема установки, с помощью которой проводилась калибровка преобразователя, приведена на рис. 6.

Внешний вид калибровочной установки приведен на рис. 7.

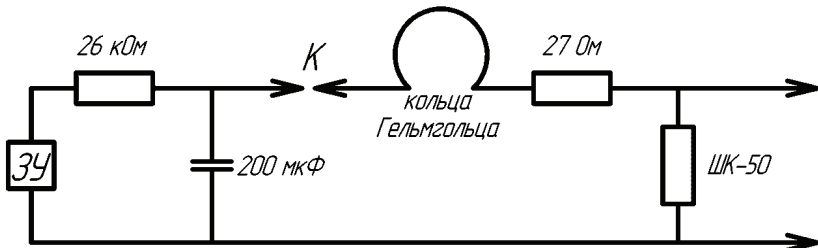


Рисунок 6 - Принципиальная схема установки

Осциллограмма импульса напряжения, снимаемого с шунта ШК-50 приведена на рис. 8 и рис. 9.

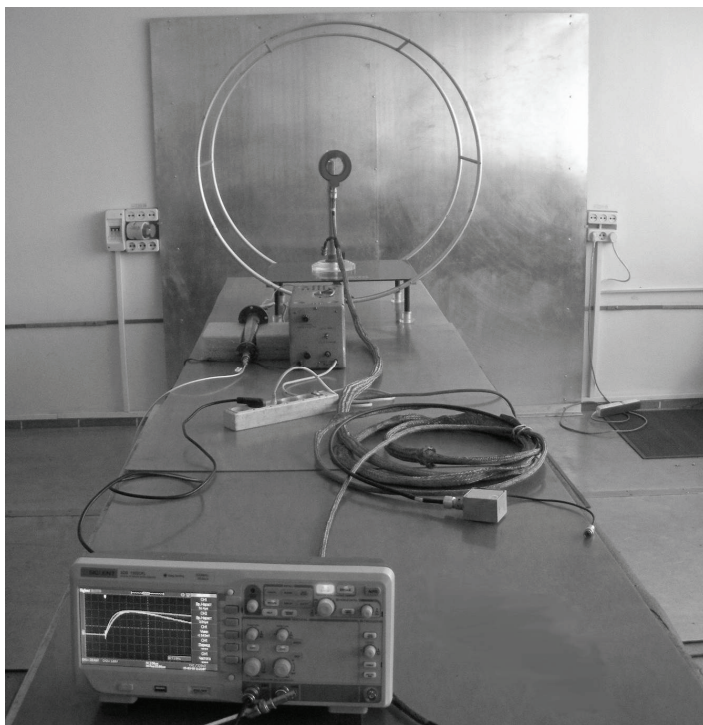


Рисунок 7 – Внешний вид калибровочной установки

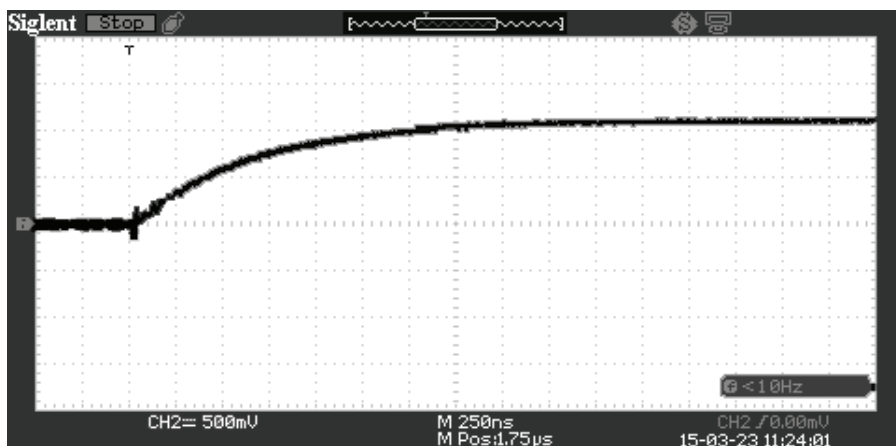


Рисунок 8 - Фронт измеряемого импульса

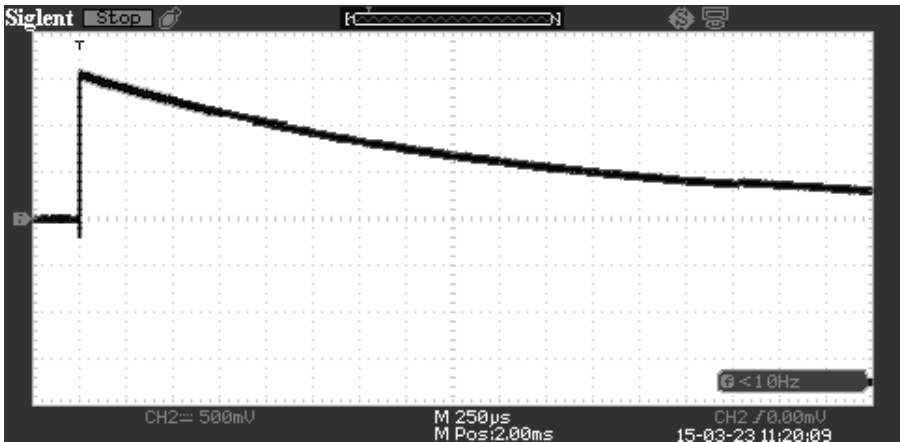


Рисунок 9 -Длительность импульса

Из рис. 8 видно, что фронт импульса напряжения, снимаемого с шунта на уровнях 0,1 и 0,9 относительно максимального значения имеет величину $T_{\Phi(0,1-0,9)} = 1,2$ (мкс).

Из рис. 9 определена длительность импульса напряжения, снимаемого с шунта на уровне 0,5 от максимального значения, составляющая $T_C = 1,5$ (мс).

Сигнал, снимаемый с датчиков приведен на рис. 10 и рис. 11.

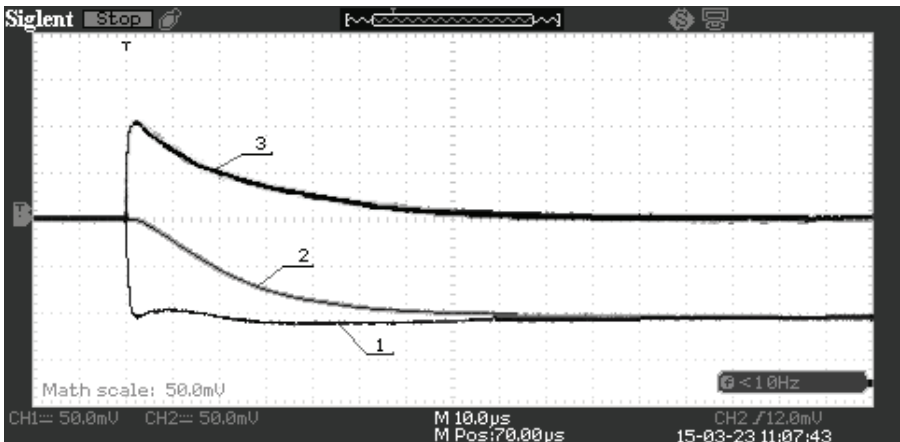


Рисунок 10 – Сигнал, снимаемый с датчиков

1 - сигнал с ИНМП-ВФ; 2 - сигнал с ИНМП-ВС; 3 - сигнал после суммирования

На рис. 10 приведен случай, когда условия (11) и (12) выполнены. Вследствие разной формы сигналов, а именно спада ИНМП-ВФ и фронта

ИНМП-ВС, существует небольшой провал, величина которого не превышает 5 %.

При сравнении осциллограмм, приведенных на рис. 9 и 11 определили, что созданный датчик спад импульса передает с погрешностью менее 5 %.

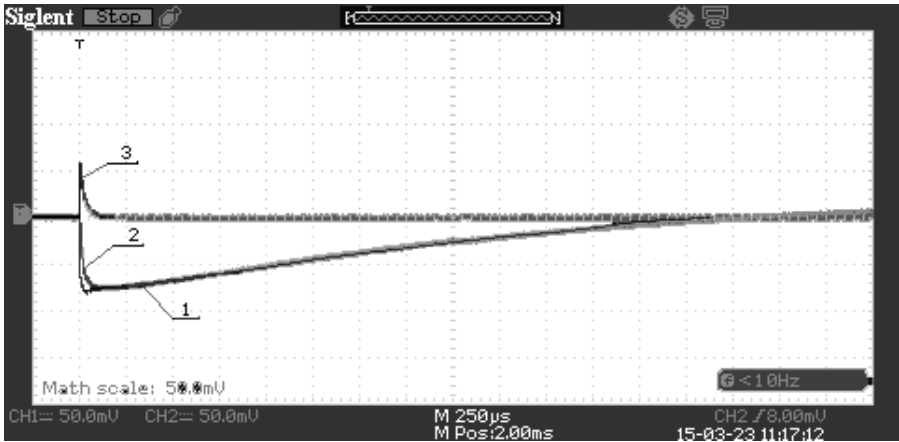


Рисунок 11 – Сигнал, снимаемый с датчиков

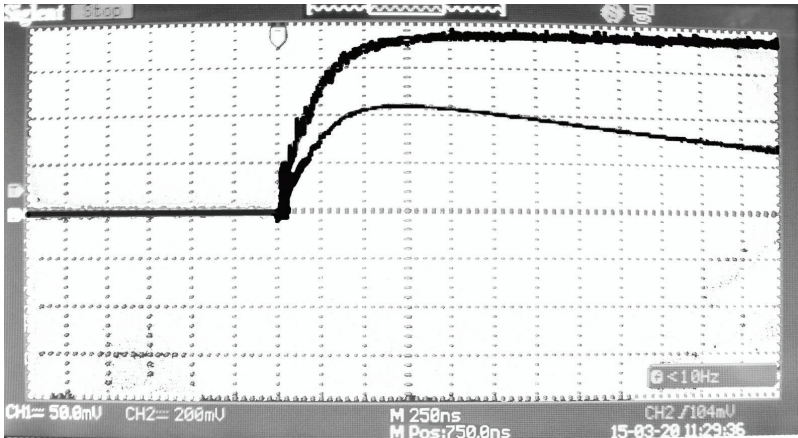


Рисунок 12 – Измерение фронта импульса

Поле в центре колец Гельмгольца рассчитывается по выражению [5]:

$$H = 0,716 \frac{I}{r}, \quad (15)$$

где r - радиус колец.

Шунт ШК-50 имеет сопротивление $R_{ш}=0,0237$ (Ом), разрядный ток

$I_p = 46,4$ (А). При расчете по (13), $H = 74,24$ (А/м).

Экспериментально определено значение чувствительность ИНМП-ВС:
 $K_{\text{ИНМП-ВС}}^{\text{эксп.}} = 1,48$ (мВ/А/м), что согласуется с расчетными значениями. Относительная погрешность расчетного значения чувствительности, если принять за истинное значение экспериментальные результаты, составляет 25 %.

Для получения импульса магнитного поля с более коротким фронтом использовали одновитковый соленоид с диаметром 0,895 м. Использовался шунт ШК-50. Осциллограммы сигнала, снимаемого с шунта и ИНМП-ВФ приведены на рис. 12.

ИНМП-ВФ измеряет фронт импульса $T_{\Phi(0,1-0,9)} = 350$ (нс) с погрешностью менее 5%.

Выводы. Спроектирован и создан измеритель напряженности магнитного поля индукционного типа для измерения сверхширокополосного биэкспоненциального импульсного магнитного поля.

Время нарастания переходной характеристики менее 350 нс, постоянная интегрирования более 1,5 мс.

Приведены условия для корректного суммирования сигнала с двух независимых преобразователей.

Смоделирована работа измерителя с помощью MicroCap.

Проведена калибровка измерителя на стенде.

Результаты калибровки и моделирования совпадают с приемлемой погрешностью.

Список литературы: 1. DSTU 3681-98 Стойкость к воздействию грозových разрядов. Технические требования и методы испытаний. – Держстандарт України, 1998. – 28 с. 2. *Oleksii Skoblikov, Volodymyr Kniaziev* Penetration of lightning electromagnetic pulses into metallic enclosures with apertures // Electric power system research. – Vol. 113, august 2014. – P. 48-63. 3. *Шаламов С.П.* Измерение импульсных магнитных полей // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2014. - № 50. – С. 161-168. 4. *Немченко Ю.С., Лесной И.П., Лантушко Б.Н, Князев В.В.* Метрологическое обеспечение эксплуатации высоковольтных импульсных электроразрядных установок // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». 2004. - № 35. – С. 29-54. 5. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 392 с.

Bibliography (transliterated): 1. DSTU 3681-98 Stojkost' k vozdeystviyu grozovyh rozrjadov. Tehnicheskie trebovanija i metody ispytanj. Derzhstandart Ukraїni, 1998. 28. Print. 2. *Oleksii Skoblikov, Volodymyr Kniaziev.* Electric power system research. Vol. 113, august 2014. 48-63. Print. 3. *Shalamov S.P.* Izmerenie impul'snyh magnitnyh polej. *Shalamov S.P Vestn. Har'k. politehn. in-ta.* 2014. No 50. 161-168 Print. 4. *Nemchenko Ju.S* Metrologicheskoe obespechenie jekspluatacii vysokovol'tnyh impul'snyh jelektrozrjadnyh ustanovok. *Nemchenko Ju.S., Lesnoj I.P., Lantushko B.N, Knjazev V.V Vestn. Har'k. politehn. in-ta.* 2004. No 35. 29-54. Print. 5. *Knopfel' G.* Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja. *L Knopfel' G.* Moscow: Mir, 1972. 392. Print.

Поступила (received) 02.04.2015

А.А. ПЕТКОВ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., профессор, НТУ «ХПИ»

СИСТЕМА ДВУХ ЕНЭ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА С МОНОТОННЫМ НАРАСТАНИЕМ И СПАДОМ ЗНАЧЕНИЙ

В работе получены модели амплитудно-временных параметров импульса тока в нагрузке, выведено соотношение, связывающее значения параметров элементов разрядной цепи при фиксированном значении отношения временных параметров импульса тока и предложена методика определения параметров элементов испытательной схемы с двумя емкостными накопителями энергии. Материалы статьи могут быть использованы для дальнейших исследований испытательных устройств с несколькими емкостными накопителями энергии.

Ключевые слова: емкостной накопитель энергии, импульс тока, амплитудно-временные параметры.

Постановка проблемы. При испытании технических средств на устойчивость к воздействию электромагнитных факторов возникает необходимость формирования импульсов тока большой амплитуды и длительности. Одной из наиболее широко используемых при испытаниях формой импульса тока является аperiодическая форма с монотонным нарастанием и спадом значений. Для создания таких импульсов используется разряд нескольких емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) с различным уровнем зарядного напряжения на общую нагрузку. Учитывая, что испытаниям подвергаются различные объекты, к амплитудно-временным параметрам (АВП) импульсов тока предъявляются различные требования и на данный момент расчет схем формирования не может считаться окончанным и требует дополнительных исследований.

Анализ публикаций. Формированию испытательных импульсов тока с использованием нескольких накопителей энергии посвящен ряд публикаций [1-6].

В [1] приведены результаты исследования для формирования тока молнии (длительность фронта – 2 мкс, длительность импульса – 50 мкс) в работе было исследовано замыкание нагрузки.

В [2, 3] описана система ЕНЭ для формирования полного тока молнии, имеющего несколько составляющих. Рассмотрено устройство и работа системы в штатном и аварийных режимах работы.

Исследования, результаты которых приведены в [4], показали, что при параллельной работе двух ЕНЭ (см. рис. 1) временные параметры импульса тока в активно-индуктивной нагрузке определяется рядом безразмерных па-

© А.А. Петков, 2015

параметров $r_1^* = \frac{R_1}{\sqrt{L_1/C_1}}$, $r_2^* = \frac{R_2}{\sqrt{L_2/C_2}}$, $r_H^* = \frac{R_H}{\sqrt{L_H/C_1}}$ – безразмерные аналоги

активных сопротивлений; $L_{21}^* = \frac{L_2}{L_1}$, $L_{H1}^* = \frac{L_H}{L_1}$, $C_{21}^* = \frac{C_2}{C_1}$, $U_{21}^* = \frac{U_2}{U_1}$ – без-

размерные аналоги индуктивностей, емкости и зарядного напряжения. При анализе используются также следующие безразмерные параметры:

$\tau^* = \frac{t}{\sqrt{L_1 C_1}}$ – безразмерный аналог времени; $I_1^* = \frac{i_1}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$, $I_2^* = \frac{i_2}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$,

$I_H^* = \frac{i_H}{U_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$, – безразмерные аналоги токов;

$J^*(\tau^*) = \int_0^{\tau^*} I^{*2}(\tau^*) d\tau = \frac{j(t)}{C_1 U_1^2} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ – безразмерный аналог интеграла действия

импульса тока, где $j(t) = \int_0^t i^2(t) dt$.

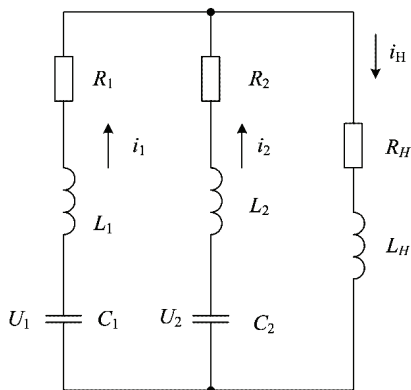


Рисунок 1 – Схема разряда двух ЕНЭ на общую нагрузку:

U_1, C_1, R_1, L_1 – зарядное напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность ЕНЭ1; U_2, C_2, R_2, L_2 – зарядное напряжение, емкость, активное сопротивление и индуктивность ЕНЭ2; R_H, L_H – активное сопротивление и индуктивность нагрузки; i_1, i_2, i_H – соответственно ток в ветвях ЕНЭ1, ЕНЭ2 и нагрузке

В работе также показано, что в зависимости от соотношения параметров схемы возможно формирование пяти характерных видов импульса тока в нагрузке.

В [5] определен вид области монотонности импульса тока. Получено описание границ области. Приведены соотношения, связывающие временные параметры импульса тока и параметры элементов схемы для режимов, соответствующих нижней границе области монотонности.

В работе [6] построены аналитические модели для определения параметров аperiodического импульса тока в нагрузке для области его монотонности в зависимости от параметров элементов разрядной цепи испытательной установки. Такой импульс определяется следующими условиями: $\frac{di_H}{dt} > 0$ –

при нарастании значений импульса тока; $\frac{di_H}{dt} = 0$ – в момент достижения

максимального значения; $\frac{di_H}{dt} < 0$ – при спаде значений (см. рис. 2).

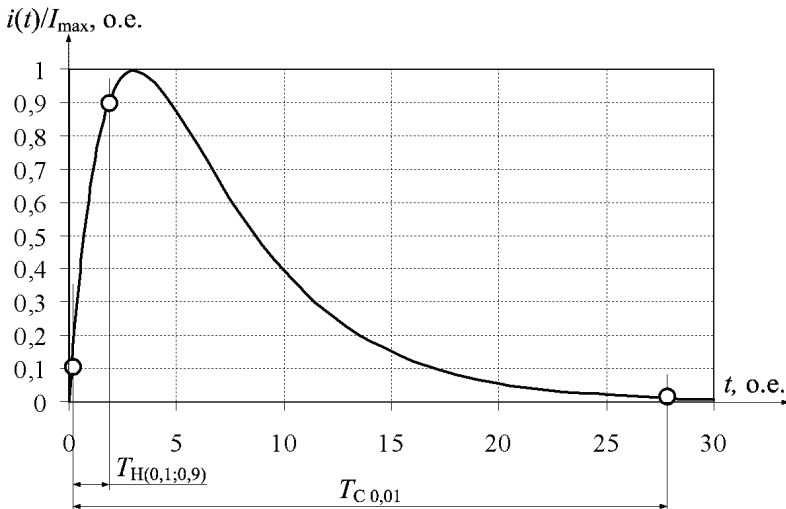


Рисунок 2 – Характерный вид униполярного аperiodического импульса с монотонным нарастанием и спадом значений

В работе получены зависимости для определения временных и амплитудных параметров импульса тока: времени достижения максимального значения, времени достижения на спаде импульса уровня 0,1 от максимального значения, времени достижения на спаде импульса уровня 0,01 от максимального значения и максимального значения тока в нагрузке. Погрешность вычисления по указанным соотношениям не превышает 9 % при: $r_1^* = 1$; $r_2^* = 0,4 - 0,7$; $r_H^* = 0,5$; $L_{21}^* = 0 - 0,2$; $L_{H1}^* = 3$; $C_{21}^* = 1000$; $U_{21}^* = 0,1$.

В ряде практических задач, возникает необходимость иметь более точные соотношения для расчета АВП импульса тока (например, при проектировании испытаний с малыми допусками на воздействующие факторы), а также, основанную на них простую методику выбора параметров элементов разрядной цепи.

Цель работы. Получение соотношений и разработка методики выбора параметров элементов разрядной цепи испытательного устройства с двумя емкостными накопителями энергии.

Материалы и результаты исследований. В результате использования методов планирования экспериментов [7] были получены следующие модели АВП импульса тока и интеграла действия, представленных в безразмерном виде:

$$\frac{\tau_{C0,01}^*}{\tau_{H(0,1,0,9)}^*} = B_0 + B_1 r_2^* + B_2 L_{21}^* + B_{12} r_2^* L_{21}^* + B_{11} r_2^{*2} + B_{22} L_{21}^{*2}, \quad (1)$$

где числовые коэффициенты равны: $B_0 = 958,5$; $B_1 = 2526,2$; $B_2 = 1197,3$; $B_{12} = -2213,3$; $B_{11} = -387,3$; $B_{22} = 2996,2$;

$$\tau_{H(0,1,0,9)}^* = A_0 + A_1 r_2^* + A_2 L_{21}^* + A_{12} r_2^* L_{21}^* + A_{11} r_2^{*2} + A_{22} L_{21}^{*2}, \quad (2)$$

где числовые коэффициенты равны: $A_0 = 2,46$; $A_1 = -1,25$; $A_2 = -1,2$; $A_{12} = 2,27$; $A_{11} = 0,5$; $A_{22} = -2,53$;

$$\tau_{C0,01}^* = D_0 + D_1 r_2^* + D_2 L_{21}^* + D_{12} r_2^* L_{21}^* + D_{11} r_2^{*2} + D_{22} L_{21}^{*2}, \quad (3)$$

где числовые коэффициенты равны: $D_0 = 2732$; $D_1 = 3134$; $D_2 = 287$; $D_{12} = -200$; $D_{11} = -556$; $D_{22} = -200$;

$$I_{H \max}^* = E_0 + E_1 r_2^* + E_2 L_{21}^* + E_{12} r_2^* L_{21}^* + E_{11} r_2^{*2} + E_{22} L_{21}^{*2}, \quad (4)$$

где числовые коэффициенты равны: $E_0 = 0,0974$; $E_1 = 0,1428$; $E_2 = -0,0495$; $E_{12} = 0,03885$; $E_{11} = -0,04987$; $E_{22} = 0,03455$;

$$J_H^* (\tau_{C0,01}^*) = F_0 + F_1 r_2^* + F_2 L_{21}^* + F_{12} r_2^* L_{21}^* + F_{11} r_2^{*2} + F_{22} L_{21}^{*2}, \quad (5)$$

где числовые коэффициенты равны: $F_0 = 8,788$; $F_1 = -9,506$; $F_2 = -0,0375$; $F_{12} = 0,0167$; $F_{11} = 4,444$; $F_{22} = 0,05$.

При: $r_1^* = 1$; $r_2^* = 0,4 - 0,7$; $r_H^* = 0,5$; $L_{21}^* = 0 - 0,2$; $L_{H1}^* = 3$; $C_{21}^* = 1000$; $U_{21}^* = 0,1$ погрешность вычисления по выражениям (1) – (5) не превышает 1 %.

Из (1) видно, что одни и те же значения отношения временных параметров могут быть получены при различных сочетаниях входящих в выражение величин. Это открывает возможности оптимизации параметров схемы, показанной на рис. 1.

Теоретический анализ показывает, что взаимосвязь параметров схемы,

при которой имеет место заданное отношение временных параметров импульса тока Y_z , определяется следующим образом:

$$r_2^* = -\frac{p}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}, \quad (6)$$

где $p = \frac{B_1 + B_{12}L_{21}^*}{B_{11}}$; $q = \frac{B_0 - Y_z + B_2L_{21}^* + B_{22}L_{21}^{*2}}{B_{11}}$.

На рис. 3 показаны линии одинакового отношения временных параметров, определенные с использованием соотношения (6).

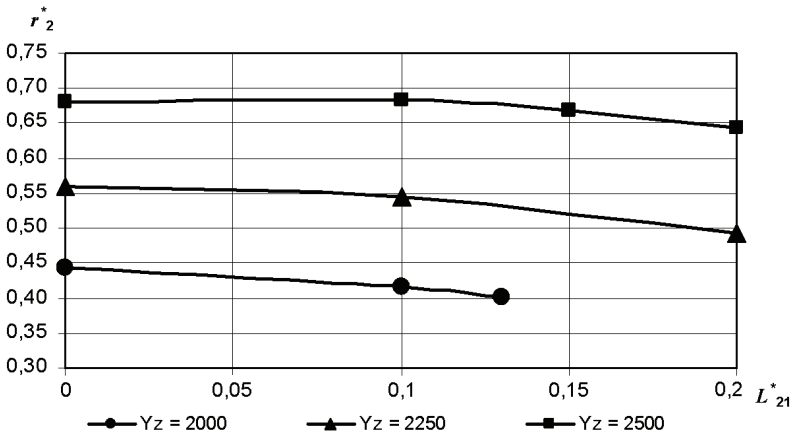


Рисунок 3 – Линии одинакового отношения временных параметров

Как видно из рисунка, двигаясь вдоль линии с требуемым отношением (то есть сохраняя значение отношения) можно выбрать соотношение параметров элементов, наиболее полно удовлетворяющее схемному решению установки.

Используя полученные соотношения, рассмотрим методику выбора параметров элементов схемы, приведенной на рис. 1 при следующих условиях. В нагрузке с параметрами $R_H = 0,2$ Ом, $L_H = 5 \cdot 10^{-6}$ Гн требуется сформировать импульс тока с максимальным значением $i_{H \max} = 1 \cdot 10^4$ А и отношением временных параметров $Y_Z = T_{C,0,1} / T_{H(0,1,0,9)} = 2250$.

Для решения задаемся значениями безразмерных величин $r_1^* = 1$; $r_H^* = 0,5$; $L_{H1}^* = 3$; $C_{21}^* = 1000$; $U_{21}^* = 0,1$; $L_{21}^* = 0,2$ и по (6) находим $r_2^* = 0,492$. Далее, используя соотношения для безразмерных величин, приведенные выше, последовательно находим параметры элементов схемы $L_1 = 1,67 \cdot 10^{-6}$ Гн, $C_1 = 1,04 \cdot 10^{-5}$ Ф, $R_1 = 0,4$ Ом, $U_1 = 2,65 \cdot 10^4$ В, $U_2 = 2,65 \cdot 10^3$ В,

$C_2 = 1,04 \cdot 10^{-2}$ Ф, $L_2 = 3,33 \cdot 10^{-7}$ Гн, $R_2 = 0,197$ Ом и расчетные параметры импульса тока $T_{H(0,1;0,9)} = 7,7 \cdot 10^{-6}$ с, $T_{C0,01} = 1,74 \cdot 10^{-2}$ с, $j(T_{C0,01}) = 9,47 \cdot 10^4$ А²·с.

В общем случае временные параметры импульса тока могут не соответствовать требуемым значениям. Тогда изменение временных параметров импульса тока (при сохранении их отношения) проводится по материалам работы [8].

Для анализа точности расчетов АВП импульса тока было проведено схемотехническое моделирование переходного процесса (с использованием Micro-Cap 8), которое показало, что относительная погрешность проведенных вычислений не превышает 5 %.

Выводы

1. Получены модели амплитудно-временных параметров импульса тока в нагрузке, которые обеспечивают расчет с погрешностью не более 1 %.

2. Выведено соотношение, связывающее значения параметров элементов разрядной цепи при фиксированном значении отношения временных параметров импульса тока.

3. Предложена методика определения параметров элементов испытательной схемы с двумя емкостными накопителями энергии.

Материалы статьи могут быть использованы для дальнейших исследований испытательных устройств с несколькими емкостными накопителями энергии.

Список литературы: 1. Баранов М.И., Игнатенко Н.Н., Колобовский А.К. Применение мощных генераторов импульсных напряжений в схеме с замыкателем нагрузки для получения больших импульсных токов молнии // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тем. выпуск: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Х.: НТУ «ХПИ», 2004. – №4. – С. 37-45. 2. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов / Баранов М.И., Коцушко Г.М., Кравченко В.И. и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 1-5. 3. Повышение надежности работы генератора импульсов тока искусственной молнии / О.С. Недзельский, А.А. Петков, А.В. Плечко, Е.Г. Понуждаева // Электротехника і електромеханіка. – 2010. – № 2. – С. 50-53. 4. Петков А.А. Разряд двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку / А.А. Петков // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ», 2007. – № 34. – С. 79-85. 5. Петков А.А. Формирование импульса тока с монотонным нарастанием и спадом значений при параллельной работе двух емкостных накопителей / А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 3. – С. 65-69. 6. Олейник О. В. Формирование апериодического импульса при разряде двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку / О. В. Олейник, А.А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – № 11. – С. 141-148. 7. Егоров А.Е., Азаров Г.Н., Коваль А.В. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента / Под ред. В.Г. Воронова. – Х.: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. – 240 с. 8. Петков А.А. Модификация параметров испытательных устройств при переводе их в новый режим эксплуатации / А.А. Петков // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. – №6. – С. 63-66.

Bibliography (transliterated): 1. Baranov M.I., Ignatenko N.N., Kolobovskiy A.K. Primenenie moschnykh generatorov impulsnykh napryazheniy v sheme s zamykatelem nagruzki dlya polucheniya

bolshih impulsnykh tokov molnii. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskii vyipusk: Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tekhnika. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2004. No 4. 37-45 Print. **2.** Generator toka iskusstvennoy molnii dlya naturnykh ispytaniy tehnicheskikh ob'ektov. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Pribory i tekhnika eksperimenta. 2008. No 3. 1-5 Print. **3.** Povyshenie nadezhnosti raboty generatora impulsov toka iskusstvennoy molnii. O.S. Nedzelskiy, A.A. Petkov, A.V. Plichko, E.G. Ponuzhdaeva. Elektrotehnika i elektromehanika. 2010. No 2. 50-53 Print. **4.** Petkov A.A. Razryad dvuh emkostnykh nakopiteley energii na obschuyu nagruzku. A.A. Petkov. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskii vyipusk: Tekhnika i elektrofizika vyisokikh napryazheniy. Kharkiv: NTU "KhPI", 2007. No 34. 79-85 Print. **5.** Petkov A.A. Formirovanie impulsa toka s monotonnym narastaniem i spadom znacheniy pri parallelnoy rabote dvuh emkostnykh nakopiteley. A.A. Petkov. Elektrotehnika i elektromehanika. 2009. No 3. 65-69 Print. **6.** Oleynik O. V. Formirovanie aperiodicheskogo impulsa pri razryade dvuh emkostnykh nakopiteley energii na obschuyu nagruzku. O. V. Oleynik, A.A. Petkov. VIsnik NTU "KhPI". Zbirnik naukovih prats. Tematichnyi vyipusk: Tekhnika i elektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU "KhPI", 2009. No 11. 141-148 Print. **7.** Egorov A.E., Azarov G.N., Koval A.V. Issledovanie ustroystv i sistem avtomatiki metodom planirovaniya eksperimenta. Pod red. V.G. Voronova. Kharkiv: Vischa shkola. Izd-vo pri Khark. un-te, 1986. 240 Print. **8.** Petkov A.A. Modifikatsiya parametrov ispytatelnykh ustroystv pri perevode ih v novyyi rezhim ekspluatatsii. A.A. Petkov. Elektrotehnika i elektromehanika. 2009. No 6. 63-66 Print.

Поступила (received) 22.04.2015

УДК 621.314: 621.391

В.В. ПИЛИНСКИЙ, канд. техн. наук, проф. НТУУ «КПИ»;
Д.М. ПРОБИТЫЙ, аспирант НТУУ «КПИ»;
А. А. ДОВЖЕНКО, ассистент НТУУ «КПИ»

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЗВУКОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИМПУЛЬСНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ И УСИЛИТЕЛЯМИ КЛАССА D

Проведен анализ известных методов моделирования помех от блоков звукотехнических систем с ключевыми элементами. Предложен подход к созданию модели в среде открытого программного обеспечения LTSpice с учетом особенностей узлов ключевого типа и эквивалента сети для прогнозирования кондуктивных помех. Проведена оценка характеристик кондуктивных помех при изменении нагрузки на выходе источника вторичного электропитания ключевого типа в режиме Burst Mode. Разработанная модель позволяет оценивать параметры электромагнитной обстановки на этапе проектирования при различных значениях частоты звукового сигнала, нагрузки, видов модуляции усилителя класса D и режимов работы источника вторичного электропитания ключевого типа.

© В.В. Пилинский, Д.М. Пробитый, А. А. Довженко, 2015

Ключевые слова: электромагнитная обстановка, схемотехническое моделирование, усилитель класса D, источник питания ключевого типа, электромагнитная совместимость, сочетанное воздействие.

Введение. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) в конкретной электромагнитной обстановке (ЭМО) по кондуктивным цепям требует применения конструктивных, схемотехнических и организационных мер и средств [1,2]. Звуковые усилители класса D имеют высокие энергетические и удельные массо-габаритные показатели, но создают электромагнитные помехи, усугубляя электромагнитную обстановку [3]. Ситуация усложняется при работе усилителей класса D совместно с источниками вторичного электропитания ключевого типа (ИВЭП КТ), также создающими электромагнитные помехи. Пример сочетанного формирования электромагнитной обстановки в кондуктивных цепях ИВЭП КТ при наличии информационных сигналов в силовых цепях (power line communication PLC) приведен в работе [4]. В таких и других аналогичных специфических условиях формирования ЭМО обеспечение электромагнитной совместимости требует разработки и использования новых нетривиальных подходов, а не только применения помеходавляющих фильтров. Это, в свою очередь, требует специальных методов моделирования электромагнитных процессов в таких цепях.

Таким образом проблема интеграции приведенных выше функциональных узлов в звукотехнической системе, в которой реализовано использование разных частот коммутации, требует разработки адекватных методов моделирования. В дальнейшем на их основе возможна реализация средств обеспечения ЭМС при сочетанном воздействии источников непреднамеренных помех, поэтому предлагаемая работа является актуальной.

Цель статьи – проанализировать методы моделирования электромагнитной обстановки, создаваемой звукотехническим объектом, состоящим из усилителя класса D и ИВЭП КТ с учетом диапазонов частот и способов коммутации для оценки характеристик системы на этапе проектирования.

Моделирование ЭМО, создаваемой источниками вторичного электропитания ключевого типа Для решения поставленной задачи, импульсный источник питания необходимо проектировать с учетом особенностей работы усилителя.

Исходя из исследований [5], следует, что уровень кондуктивных помех в преобразователях ключевого типа возрастает при отсутствии нагрузки на выходе (рис. 1).

Для уменьшения данного эффекта в исследуемых звукотехнических системах, целесообразно использовать источник питания, работающий в режиме малого времени открытого ключа (Burst Mode) [6], что позволяет значительно

но снизить уровень помех на выходе ИВЭП при малых токах потребления.

В модель, представленную на рис. 2, включен двухъячеечный эквивалент сети, рекомендованный CISPR [7], что позволяет исследовать зависимость ЭМО источника питания от выходной нагрузки и частоты модуляции.

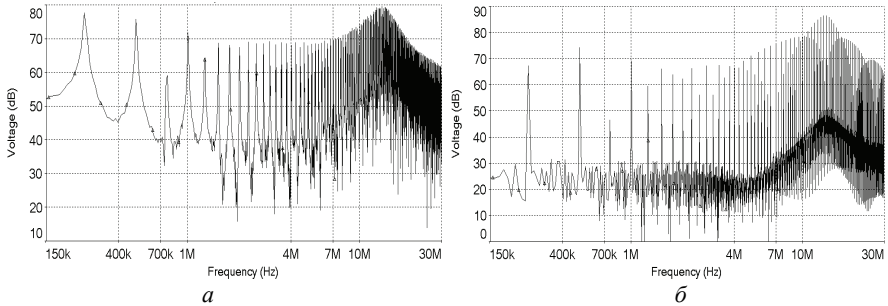


Рисунок 1 – Уровни кондуктивных помех преобразователя ключевого типа:
а – с нагрузкой; б – без нагрузки

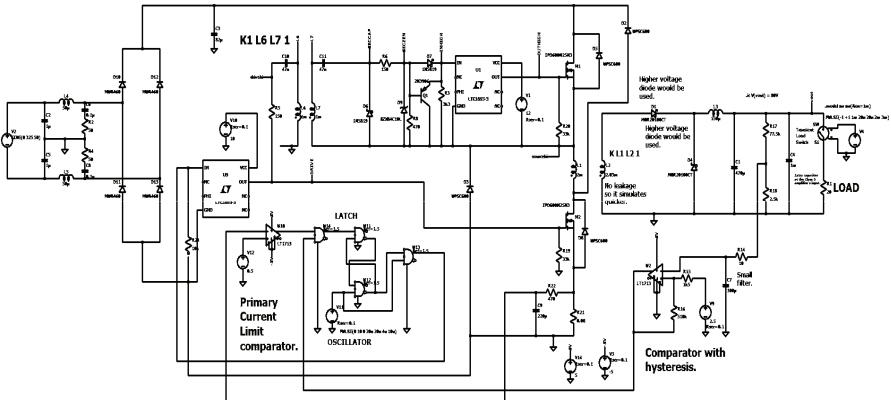


Рисунок 2 – Модель ИВЭП, работающего в режиме Burst mode

На рис. 3 показаны временные диаграммы напряжения на силовом каскаде и помехи, измеряемые на эквиваленте сети, от нагрузки на выходе ИВЭП при использовании режима Burst Mode. Таким образом, моделирование подтверждает эффективность использования данной техники в звукотехнических системах.

Влияние частоты модуляции на параметры ЭМО источника питания при постоянной нагрузке 100 Вт показано на рис. 4. При увеличении частоты модуляции ИВЭП уровни кондуктивных помех на эквиваленте сети снижаются в звуковом диапазоне частот.

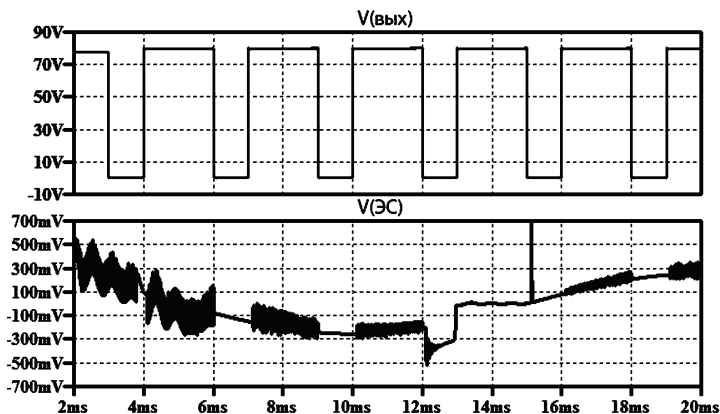


Рисунок 3 – Временные характеристики кондуктивных помех при изменении нагрузки на выходе ИВЭП в режиме Burst Mode

Моделирование ЭМО, создаваемой усилителем класса D. При проектировании звукотехнических систем часто отдают предпочтение усилителям класса D, построенным по технологии UcD (Universal class D) [8]. В отличие от типовой, данная схема позволяет использовать звуковой сигнал в качестве модулирующего, что приводит к уменьшению количества элементов схемы и, соответственно, путей распространения кондуктивных помех.

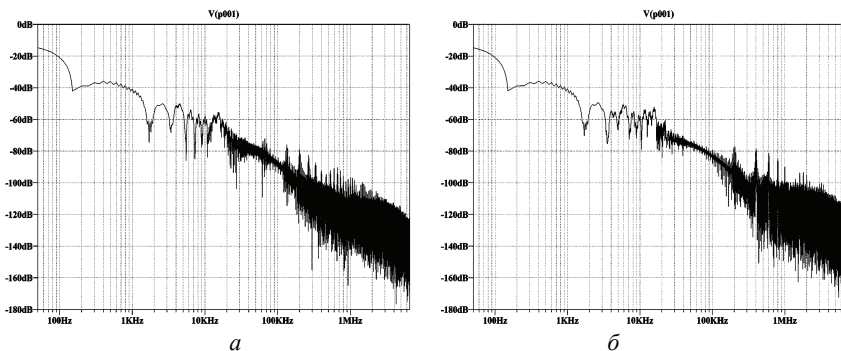


Рисунок 4 – Спектр кондуктивных помех модели ИВЭП:
 а – при частоте модуляции 66 кГц; б – при частоте модуляции 200 кГц

Модель, представленная на рис. 5, позволяет исследовать ЭМО усилителя класса D, а также спектр выходного сигнала, в зависимости от частоты и параметров входного сигнала.

На рис. 6 показаны спектрограммы выходного сигнала усилителя класса D при разной частоте входного звукового сигнала, из которых следует, что изменение частоты сигнала влияет на спектр помех усилителя.

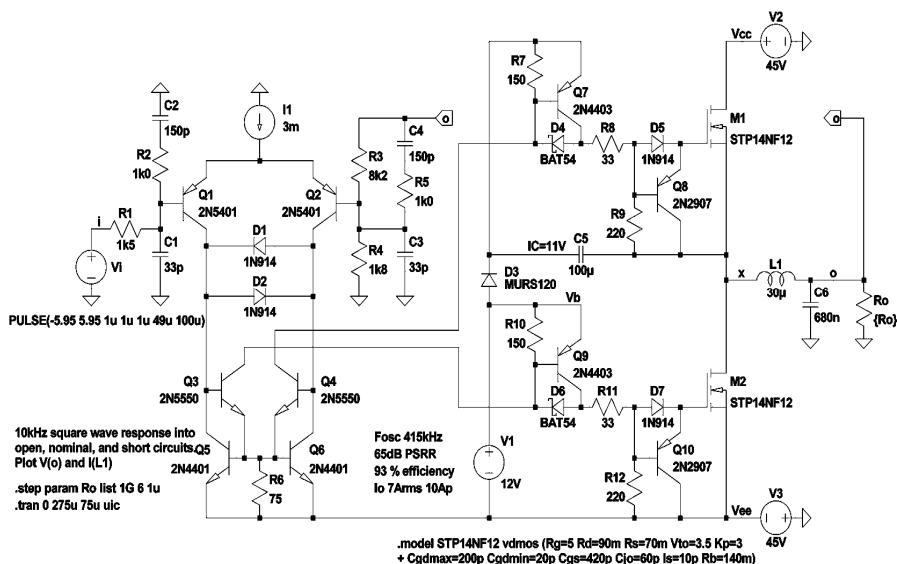


Рисунок 5 – Модель усилителя класса D, построенного по технологии Ucd8

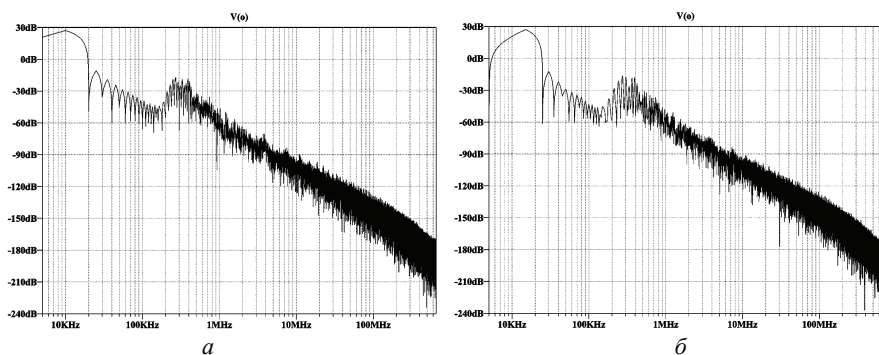


Рисунок 6 – Спектр выходного сигнала усилителя класса D:

а – при частоте входного звукового сигнала 10 кГц, б – при частоте 15 кГц

Моделирование ЭМО, создаваемой звукотехнической системой. Разработка звукотехнических устройств с использованием узлов с ключевым режимом работы требует особого внимания на этапе проектирования, поскольку может привести к появлению сочетанных неконтролируемых возбуждений

Для оценки ЭМО системы предложена модель, позволяющая оценить зависимость уровней кондуктивных помех в питающую сеть, спектр выходного звукового сигнала в зависимости от изменяемых параметров сигнала на

входе усилителя и режимов работы ИВЭП (рис. 7).

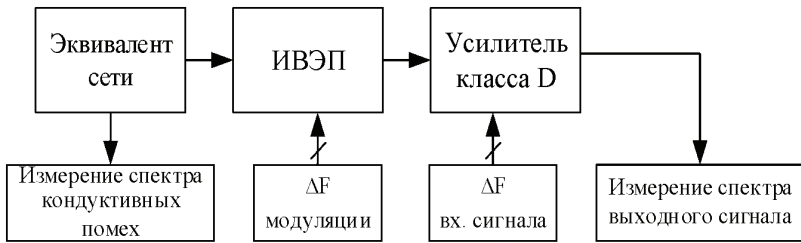


Рисунок 7 – Структурная схема модели для исследования сочетанного воздействия узлов ключевого типа звукотехнической системы.

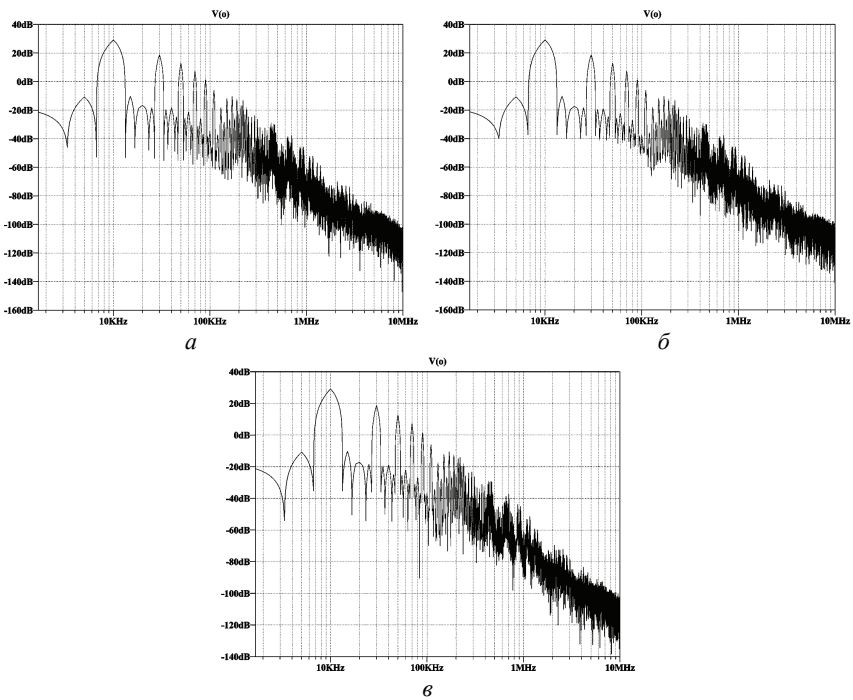


Рисунок 8 – Спектр сигнала на выходе усилителя: а – при частоте модуляции ИВЭП 100 кГц; б – при частоте модуляции 200; в – при частоте модуляции 415 кГц

Моделирование сочетанного воздействия системы приобретает особенное значение при использовании усилителей класса D типа UcD, поскольку возникает необходимость учитывать воздействие частоты самовозбуждения усилителя, которая зависит от частоты входного звукового сигнала [9]. Мо-

делирование работы усилителя показало, что при входном сигнале 10 кГц частота осцилляции составила 415 кГц (рис. 8).

Анализ результатов моделирования, обобщенных на рис. 9, показал принципиальную возможность уменьшения уровня помех на частоте 1 МГц на 20 дБ путем уменьшения частоты переключения ИВЭП КТ.

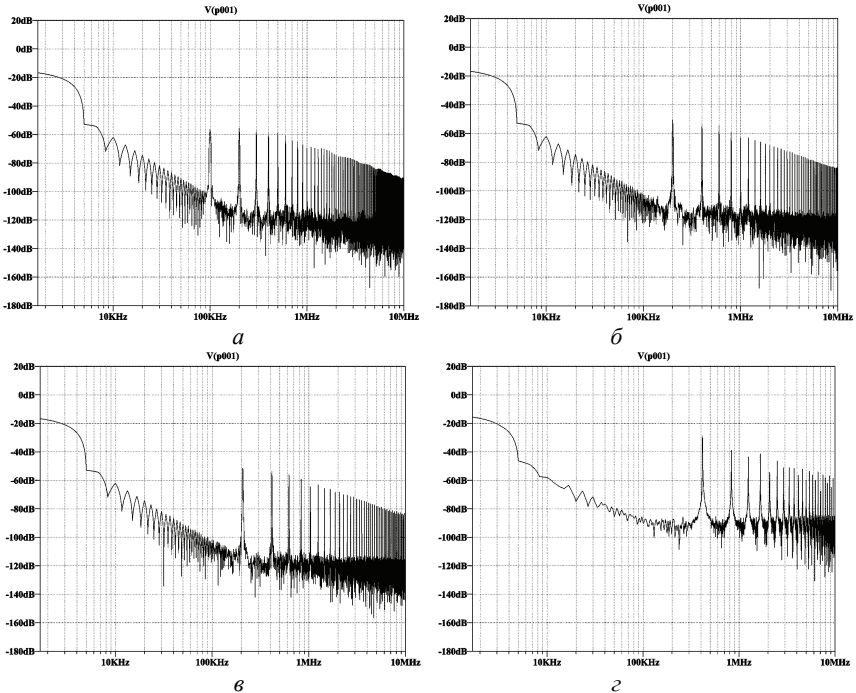


Рисунок 9 – Уровни кондуктивных помех системы: *а* – при частоте модуляции ИВЭП 100 кГц; *б* – при частоте 200 кГц; *в* – при частоте 207; *г* – при частоте 415 кГц

Выводы. Таким образом, на основе анализа известных методов моделирования кондуктивных помех ИВЭП КТ и усилителей звуковых частот класса D предложен метод моделирования звукотехнической системы, построенной на основе функциональных узлов ключевого типа, иллюстрирующий возможность исследования влияния сочетанного воздействия на электромагнитную обстановку и выходные параметры звукового сигнала. Поскольку модель разработана в открытой масштабируемой среде моделирования LTSpice, предложенный метод может быть использован при проектировании более сложных звукотехнических систем.

Список литературы: 1. Векслер Г.С. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Г.С. Векслер и др. – К.: Техніка, 1990. – 167 с. 2. Кечиев Л.Н. ЭМС и информационная

безопасность в системах телекоммуникации / Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 320 с. 3. *Оникієнко Ю.А.* Прогнозирование кондуктивных помех усилителя класса D / Ю.А. Оникієнко, В.В. Пилинский, В.В. Швайченко // Технологии электромагнитной совместимости. – 2014. – № 1 (48). – С. 3-9. 4. *Pilinsky V.* Assessment of Electromagnetic Environment Mains occurring by SMPS & PLC Systems / V. Pilinsky, A. Rozvadovsky, I. Zaicev // C 8-6. Proceedings of the 11-th Int. Symp. On EMC «EMC Europe 2012». – Rome, 2012. 5. *Onikienko Y.* Simulation of Electromagnetic Environment of Class D Amplifier / Y. Onikienko, V. Pilinsky, D. Probity, V. Shvaychenko // Electronics and Nanotechnology (ELNANO): IEEE Conf., 2013. – P. 396-398. 6. *Min-Sung Kim* Advanced Burst Mode Control to Reduce the Standby Power of Flyback Converter / *Min-Sung Kim* et al. // Scientific Research: Engineering, 2013. – P. 137-141 7. CISPR 22 Edition 6.0 2008-09 IEC STANDARDS+ Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. – Режим доступа: http://webstore.iec.ch/p-preview/info_cispr22%7Bed5.2%7Den_d.pdf. 8. *McGarry* The standby power challenge / *McGarry* // Proc. Of IEEE AGEC, 2004. – P. 56-62. 9. *Bruno Putzeys* Simple Self-Oscillating Class D Amplifier with Full Output Filter Control // Spain: Audio Engineering Society Convention 118 – 2005. – Режим доступа: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13169>.

Bibliography (transliterated): 1. Veksler G.S. et al. *Podavlenije elektromagnitnyh pomeh v cepjah elektropitanija*. Kiev: Technika, 1990. Print. 2. Kechiev, L. N. , and Stepanov, P.V. EMS i informacionnaja bezopasnost' v sistemah telekommunikacij Moscow: Izdatelskij dom Tehnologiji, 2005. Print. 3. Y. Onikienko, V. Pilinsky, V. Shvaychenko. "Prognozirovanie konduktivnyh pomeh usilitelya klassa D." *Technologii elektromagnitnoy sovmestivosti*. No 1 (48). 2014. 3-9. Print. 4. V. Pilinsky, A. Rozvadovsky, I. Zaicev. "Assessment of Electromagnetic Environment Mains occurring by SMPS & PLC Systems." Rome: Proceedings of the 11-th Int. Symp. On EMC «EMC Europe 2012». 2012. 8-6. Print. 5. Y. Onikienko, V. Pilinsky, D. Probity, V. Shvaychenko. "Simulation of Electromagnetic Environment of Class D Amplifier." *Electronics and Nanotechnology (ELNANO): IEEE Conf.* 2013. 396-398. Print. 6. Min-Sung Kim et al. "Advanced Burst Mode Control to Reduce the Standby Power of Flyback Converter" *Scientific Research: Engineering*, 2013. 137-141. Print. 7. CISPR 22 Edition 6.0 2008-09 IEC STANDARDS+ Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. Web. 29 September 2014 <http://webstore.iec.ch/p-preview/info_cispr22%7Bed5.2%7Den_d.pdf>. 8. McGarry "The standby power challenge" *Proc. Of IEEE AGEC*. 2004. 56-62. Print. 9. Putzeys, Bruno "Simple Self-Oscillating Class D Amplifier with Full Output Filter Control" Spain: *Audio Engineering Society Convention 118*. Web. 1 May 2005 <<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13169>>.

Поступила (received) 23.03.2015

И.А. ПОСТЕЛЬНИК, аспирант НТУ «ХПИ»;
В.В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В статье представлено описание аппаратно-программного комплекса разработанного с целью измерения экранирующих свойств корпусов электрооборудования, а также возможностью использования его в качестве обратной связи в системе автоматической регулировки уровня создаваемого электромагнитного поля. Приведена пошаговая реализация аппаратно-программного комплекса. Описаны конструктивные решения аппаратной части. Рассмотрена проблема использования коаксиальных линий связи в измерениях экранирующих свойств. Особо эффективно использование в аппаратно-программном комплексе оптической линии связи для обмена данными. Описана функциональная часть интерфейса программной части.

Ключевые слова: измеритель напряженности электрического поля, волоконно-оптическая линия, аппаратно-программный комплекс, логарифмический детектор, ЭМС, экранирующие свойства.

Введение

Для проведения испытаний соответствия уровня устойчивости бортового оборудования (БО) летательных аппаратов к действию высоко интенсивных радиочастотных электромагнитных полей (HIRF) зачастую необходимо экспериментально определить уровень экранирующих свойств корпуса БО. Высокая достоверность измерения экранирующих свойств обеспечивается с использованием оптических линий передачи информации. Экранирующие свойства корпуса БО минимальны в диапазоне его основных резонансных частот, которые лежат в диапазоне от 300 МГц до 3000 МГц. Создание достаточно чувствительного датчика электрического поля с оптической линией передачи информации является важной практической задачей, поставленной в рамках подготовки испытательной лаборатории НИПКИ «Молния».

Также для проведения испытаний устойчивости оборудования к воздействию внешних электрических полей в сходном диапазоне от 300 МГц до 3 ГГц, возникает необходимость использования обратной связи для автоматического регулирования уровня (АРУ) амплитуды генерируемой электрической составляющей на всем диапазоне частот. И в этом случае применение оптической линии связи имеет существенные преимущества по сравнению с коаксиальной кабельной линией, обусловленные высоким уровнем помехозащищенности оптического тракта.

Представленный в данной статье аппаратно-программный комплекс яв-

© И.А. Постельник, В.В. Князев, 2015

ляется универсальным решением и может использоваться в обоих указанных выше случаях.

Конструктивные решения аппаратной части

Использование датчиков Е-поля с кабельной линией связи может привести к ошибочному результату оценки экранирующих свойств корпуса. Вероятность такого результата возрастает по мере улучшения этих свойств, поскольку полезный сигнал теряется на фоне помех, принимаемых самой кабельной линией. В результате, реальный уровень экранирующих свойств корпуса не может быть определен. Применение оптической линии связи в значительной мере улучшает помехоустойчивость системы, тем самым повышается достоверность результатов. В [1] приведен пример передачи сигнала с использованием современных волоконно-оптических элементов. Описанный в [1] электрический преобразователь оптический (ЕПО-1) использует оптическую линию для передачи аналогового сигнала. В ходе работы с ЕПО-1 были выявлены явные недостатки. На уровень передачи аналогового сигнала по оптической линии влияет качество соединения оптических элементов. Для регистрации сигнала с ЕПО-1 все также возникает необходимость применения анализаторов спектра или осциллографов с полосой пропускания до 3 ГГц. Отсутствует возможность получать информацию о состоянии ЕПО-1, или удаленного управления его энергосбережением. Также, аналоговые оптические передатчики являются энергоемкими, что снижает эффективное время работы устройства.

Эти недостатки можно устранить, реализовав в ЕПО-2 измерение среднеквадратичного значения электрической составляющей, определяя ее амплитуду по уровню детектированного сигнала. Следовательно, это дает возможность применить более «медленные» цифровые оптические линии передачи данных.

Первоначально необходимо получить возможность измерения среднеквадратического значения СВЧ поля. Для этих целей, как и в предыдущем исполнении, для выделения электрической составляющей применяется несимметричная (штыревая) антенна (ANT) (см. рис. 1). В качестве нагрузки антенны выступает согласующее сопротивление (R_{match}). Падение напряжения на резисторе служит мерой напряженности электрического поля. Для определения среднеквадратического значения амплитуды применен высокоточный логарифмический детектор СВЧ (LD) AD8313 производства фирмы Analog Device (см. рис. 2). Логарифмический детектор AD8313 – это микросхема внутри которой находится 8 прецизионных усилителей с диапазоном до 3,5 ГГц. Подавая на симметричный вход INHI/INLO измеряемый сигнал на выходе VOUT получаем постоянный уровень прямо пропорциональный входному среднеквадратическому значению напряжения СВЧ.

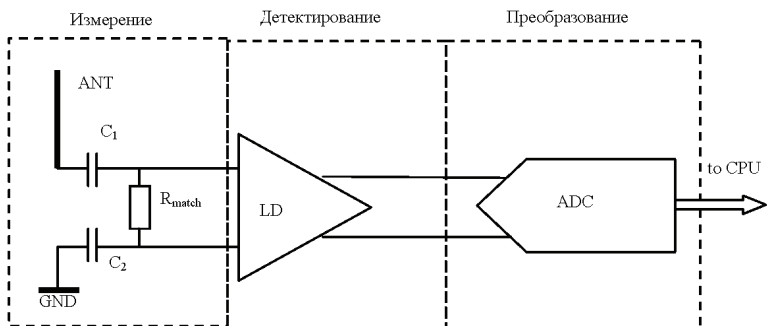


Рисунок 1 – Структурная схема измерительного блока

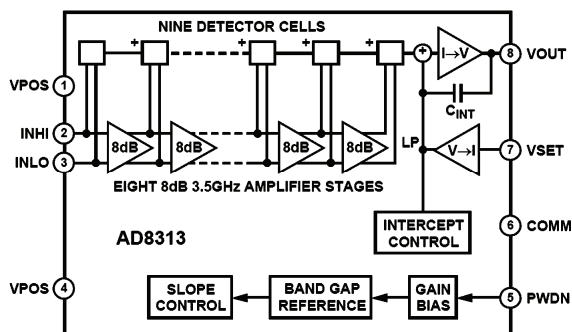


Рисунок 2 – Функциональная схема логарифмического детектора (LD) СВЧ

Детектированный и усиленный сигнал подается на аналогово-цифровой преобразователь (ADC). Сигнал в цифровом виде принимается микропроцессором (CPU) (см. рис. 3).

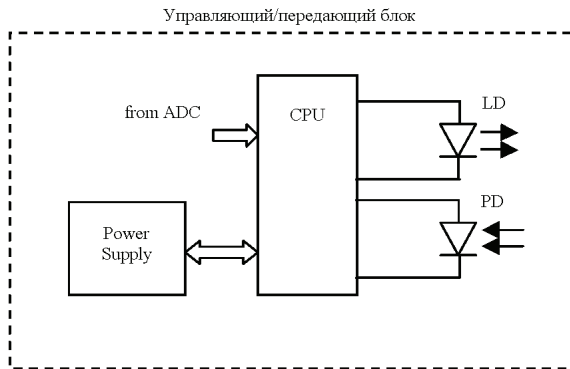


Рисунок 3 – Блок управления и передачи данных

Для приема и передачи информации по оптической линии применены приемник (PD) HFBR-2412, и передатчик (LD) HFBR-1412 производства фирмы Avago Technologies. Используемые оптические элементы позволяют передавать сигнал на расстояние до 1500 м, со скоростью 5 Мбит/сек. Частота семплирования АЦП составляет 250 Гц, с разрядностью 16 бит, тогда скорость получения цифровых данных составляет 4 кБит/сек. Следовательно, пропускной способности оптического тракта вполне достаточно.

Обмен данными с компьютером по оптической линии производится в дуплексном режиме. Для обмена информацией применяется асинхронный последовательный интерфейс RS-232. С помощью конвертера RS-232/USB разработанное устройство подключается к компьютеру через порт USB, что дает возможность использовать систему на портативных компьютерах в которых отсутствует физическая реализация COM-порта.

Если ЕПО-2 используется как обратная связь в системе АРУ, то к компьютеру через консоль управления подключается генератор СВЧ сигнала, задается требуемый режим его работы, и система автоматически поддерживает постоянный установленный уровень напряженности электрического поля в заданной точке измеряемого пространства, там где находится измеритель.

Применение в ЕПО-2 таких конструктивных решений, позволило избавиться от указанных выше недостатков, присущих ЕПО-1. Исключена возможность влияния оптических соединителей на уровень сигнала, за счет передачи данных в цифровом виде. Нет необходимости использовать анализаторы спектра или осциллографы. Информация отображается и сохраняется на компьютере. За счет малого потребления цифровых оптических излучателей удалось снизить потребление тока устройством с 110 мА до 20 мА. Появилась возможность удаленно переводить измеритель в энергосберегающий режим и также удаленно переводить его в режим измерений.

Интерфейс программной части

Программа представляет собой оконное приложение с понятным пользователю интерфейсом (см. рис. 4), написана на языке С++. Программа позволяет управлять тремя ЕПО-2, а также другим оборудованием, которое используется для испытаний: генератор и усилитель мощности СВЧ сигнала и т.д.

Назначение программы – автоматизировать процесс проведения испытаний, отобразить полученные данные на экране компьютера в виде графика. Оператору необходимо подключить оборудование, задать параметры работы системы, заданные для проведения испытаний. После этого, запустить работу программы нажав кнопку «Запуск».

Для задания параметров работы программы необходимо заполнить указанные поля. Установить начальную и конечную частоту работы генератора, уровень амплитуды его выходного сигнала и шаг перестройки частоты генератора. Установить успешное соединение с подключенным оборудованием.

И после этого уже запустить исполнения программы по автоматизации проведения испытаний.

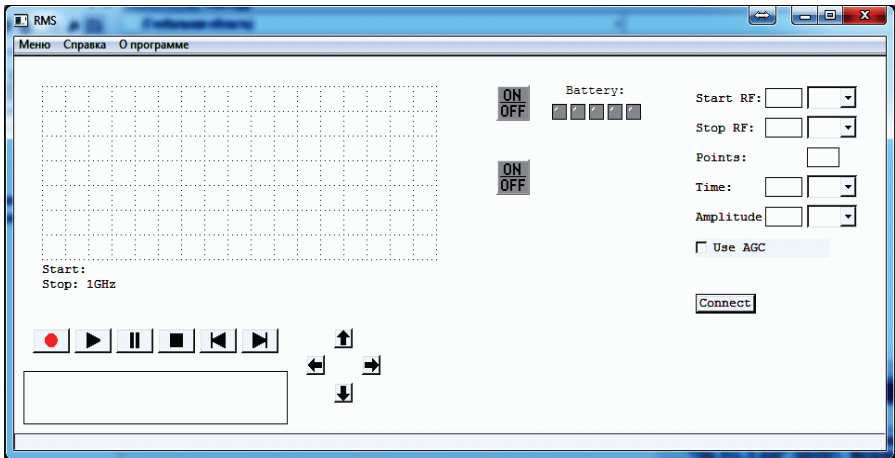


Рисунок 4 – Главное окно программы

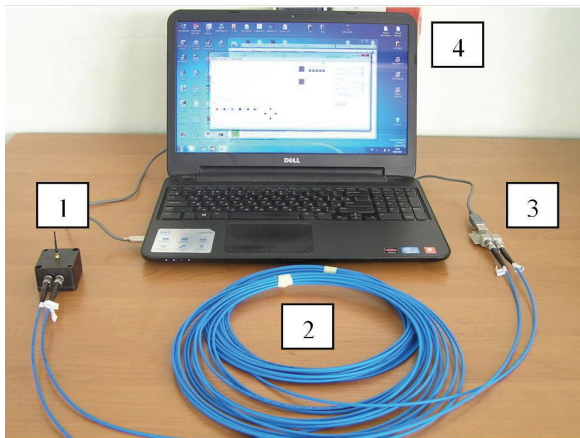


Рисунок 5 – Аппаратно-программный комплекс: 1 – ЕПО-2; 2 – волоконно-оптическая линия; 3 – преобразователь RS232/USB; 4 – персональный компьютер)

Для проведения измерений эффективности экранирования корпусов необходимо подключить измерители и генератор СВЧ сигналов. Один ЕПО-2 размещается внутри корпуса, второй находится снаружи и размещается в проекции первого измерителя рядом с корпусом. Третий ЕПО-2 используется в качестве обратной связи в АРУ, для поддержания постоянного уровня напряженности излучения во всем частотном диапазоне. Далее требуется уста-

новить параметры испытаний, такие как диапазон частоты измерения и уровень амплитуды сигнала генератора. Уровень амплитуды задается в пересчете на создаваемую усилителем и антенной напряженность электрического поля. Динамический диапазон ЕПО-2 составляет 70 dB. Следовательно, разность напряженности электрического поля внутри и снаружи корпуса можно измерить в пределах 70 dB. Определение эффективности экранирования корпуса в динамическом диапазоне 70 dB соответствует положению нормативных документов, регламентирующих требования к экранированию корпусов. Информация о напряженности поля с датчиков выводится в графическом поле окна программы. Отображается в виде графиков зависимости амплитуды от частоты. Это позволяет визуализировать частоты на которых корпус имеет низкую эффективность экранирования.

Выводы

Реализован аппаратно-программный комплекс, позволяющий произвести автоматизацию процесса исследования экранирующих свойств корпусов, и упростить работу, используя персональный компьютер, как прибор регистрации и отображения информации о значениях измеренных величин (см. рис. 5).

Применение измерения среднеквадратического значения напряженности электрического поля позволило использовать цифровые оптические линии передачи. Это обеспечило ряд существенных преимуществ аппаратно-программного комплекса по сравнению с использовавшимися ранее.

Результаты применения аппаратно-программного комплекса, результаты калибровки, динамические характеристики прибора будут представлены в следующей статье.

Список литературы: 1. *Князев В.В.* Измерение эффективности экранирования электрического поля корпусами авионики в СВЧ диапазоне / *В.В. Князев, И.А. Постельник* // Украинский метрологический журнал. – 2014. – № 4. – С. 31-34. 2. *Шварц Н.З.* Усилители СВЧ на полевых транзисторах / *Н.З. Шварц.* – М.: Радио и связь, 1987. – 200 с. 3. *Маттей Г.Л.* Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Том 1/ *Г.Л. Маттей.* – М.: Связь, 1971. – 438 с. 4. <http://www.avagotech.com/pages/home> 5. Data Sheet - HFBR-1412Z, Fiber Optic Transmitter. 6. Data Sheet - HFBR-2412Z, Fiber Optic Receiver. 7. *Ротхаммель К.* Энциклопедия антенн. В двух томах. / *К. Ротхаммель.* – М.: ДМК Пресс, 2011. – 814 с. 8. *Ott Henry W.* Electromagnetic Compatibility Engineering / *Ott Henry W.* – Wiley & Sons Inc., 2009. – 862 p.

Bibliography (transliterated): 1. Kniaziev V.V. Yzmerenye efektyvnosti ekranirovaniya elektrycheskoho polya korpusamy avyonyky v SVCh dyapazone. V.V. Kniaziev, Y.A. Postel'nyk. Ukrain'skyu metrolohychesky zhurnal. 2014. No 4 (104). 31-34. Print. 2. Shvarts N.Z. Usulytely SVCh na polevykh tranzystorakh. N.Z. Shvarts. Moscow: Radyo y svyaz'. 1987. 200 Print. 3. Matthey H.L. Fyl'try SVCh, sohla-suyushchye tsepy y tsepy svyazy. Vol. 1. H.L. Matthey. Moscow: Svyaz'. 1971. 438 Print. 4. <http://www.avagotech.com/pages/home> 5. Data Sheet - HFBR-1412Z, Fiber Optic Transmitter. 6. Data Sheet - HFBR-2412Z, Fiber Optic Receiver. 7. Rotkhammel' K. Entsyklopedyya antenn. In 2 vol. Rotkhammel' K. M.: DMK Press, 2011. 814 Print. 8. Ott Henry W. Electromag-netic Compatibility Engineering. Ott Henry W. Wiley & Sons Inc., 2009. 862 Print.

Поступила (received) 18.03.2015

В.В. РУДАКОВ, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
А.А. КОРОБКО, аспирант, мл. науч. сотр., НИПКИ «Молния»
НТУ «ХПИ»

РЕЗОНАНСНЫЕ СПЕКТРЫ НЕОДНОРОДНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ СРЕД В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

В работе проведен анализ частотных спектров классического однородного коаксиального резонатора с электрической длиной, равной $1/4$ длины волны и неоднородного коаксиального резонатора на линиях с различными волновыми сопротивлениями. Частотный спектр классического резонатора характеризуется малым разномом частот первого и второго резонансов, что позволяет использовать его исключительно в схемах с исследованием амплитудно-частотных характеристик для определения диэлектрической постоянной заполняющей его среды. Предложен новый тип неоднородного резонатора коаксиального типа на линиях с различными волновыми сопротивлениями. Частотный спектр неоднородного резонатора характеризуется резким (до 4 раз) уменьшением первой резонансной частоты и существенным (до 5 раз) увеличением разности первой и второй резонансных частот. Неоднородный резонатор имеет в 4 раза меньшую геометрическую длину и может использоваться в режиме свободных колебаний измерительного генератора. Неоднородный резонатор позволяет осуществлять измерения диэлектрической постоянной среды в расширенном частотном диапазоне от десятков мегагерц до 1,8 ГГц.

Ключевые слова: резонансные спектры, неоднородный коаксиальный резонатор, диэлектрическая проницаемость, жидкая среда.

Введение. Одной из составляющих частей диэлькометрического метода определения влагосодержания в жидких средах (трансформаторное масло, нефть, углеводородные топлива и т.д.) является резонансный способ определения диэлектрической проницаемости [1,2].

В работе [3] были проведены исследования резонансного способа определения диэлькометрической проницаемости жидких сред, заключающиеся в последовательном определении резонансных частот LC колебательного контура, образованного катушкой индуктивности, паразитной емкостью измерительного генератора и емкостью измерительного преобразователя емкостного типа, для случая заполнения его воздухом $\epsilon = 1$ и для случая заполнения исследуемой жидкой средой $\epsilon > 1$. Использованные при этом схематические и конструктивные решения позволили существенно расширить диапазон измеряемых величин влагосодержания в нефтяных маслах в сторону малых величин влагосодержания. Расширение диапазона в сторону малых величин влагосодержания осуществлялось следующими способами:

– уменьшение нестабильности величины генерируемых измерительным генератором частот;

© В. В. Рудаков, А.А. Коробко, 2015

- уменьшением величины паразитных емкостей измерительного генератора;
- уменьшением паразитной ("слепой") емкости измерительного преобразователя.

В процессе проведения исследований [3] было выявлено, что для дальнейшего расширения диапазона измерения влагосодержания в сторону малых значений ($10^{-3} \% - 10^{-2} \%$) наиболее перспективным является измерение на увеличенных по сравнению с [3] частотах – на частотах СВЧ диапазона, вплоть до $\approx 1,8$ ГГц (эта величина определяется исключительно частотной дисперсией величины диэлектрической проницаемости воды). При этом величина паразитной «слепой» емкости измерительного преобразователя должна быть минимальной.

Задачей работы является разработка нового типа измерительного преобразователя СВЧ диапазона и исследование его резонансных характеристик.

Описание исследований. На первом этапе исследований был проведен анализ резонансных спектров известного классического четвертьволнового коаксиального резонатора [4], представленного на рис. 1, широко используемого для определения диэлектрических характеристик различных сред в СВЧ диапазоне.

Классический четвертьволновой коаксиальный резонатор (рис. 1) представляет собой закороченной с одной стороны и разомкнутый с другой стороны отрезок однородной линии передачи. Пространство между внутренним и внешними электродами заполняется исследуемой средой (жидкостью), резонансная частота резонатора обратно пропорциональна величине $\sqrt{\varepsilon}$ исследуемой среды. Емкостной элемент связи А предназначен для внешней связи резонатора с измерительным генератором.

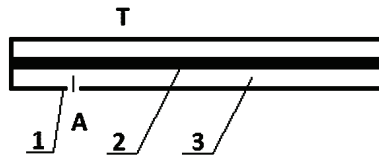


Рисунок 1 – Четвертьволновой однородный коаксиальный резонатор:
 1 – внешний электрод; 2 – внутренний электрод; 3 – исследуемая среда;
 А – емкостной элемент связи резонатора (емкостной штырь)

Четвертьволновой резонатор характеризуется величиной «слепой» емкости равной нулю (внутренний электрод закорочен с внешним), что существенно отличает его от измерительных преобразователей чисто емкостного типа [1-3], в которых для конструктивного закрепления одного из электродов

обязательно использование диэлектрика как конструктивного элемента.

Очевидным недостатком классического однородного четвертьволнового коаксиального резонатора является его большая геометрическая длина при использовании нижних частот СВЧ диапазона.

Этот недостаток отсутствует у резонаторов закрытого типа: торообразного и Н- видов [4,5], однако их замкнутый тип делает крайне затруднительным точное определение их резонансных частот, вследствие необходимости их разборки в процессе определения диэлектрических характеристик исследуемых сред.

Учитывая вышеизложенное, был предложен новый тип коаксиального резонатора – неоднородного типа, который не предполагает его разборки в процессе измерений рис. 2.

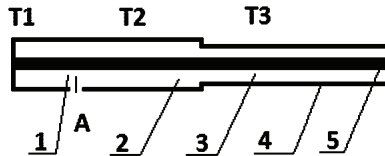


Рисунок 2 – Неоднородный коаксиальный резонатор в виде коаксиальных линий Т1-Т3: 1 – область линии Т1; 2 – область линии Т2; 3 – область линии Т3; 4,5 – внешний и внутренний электроды, А - емкостной элемент связи

Неоднородный коаксиальный резонатор состоит из трех коаксиальных линий разной электрической длины с различными волновыми сопротивлениями и емкостного элемента связи.

Ограничивая область резонансных частот отсутствием поперечных резонансов в неоднородном резонаторе, его схема замещения имеет вид, представленный на рис. 3.

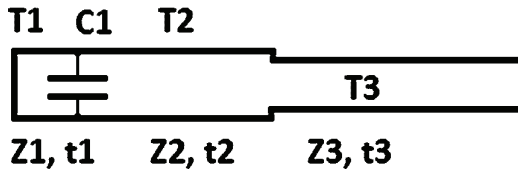


Рисунок 3 – Схема замещения неоднородного коаксиального резонатора: $Z_1, t_1; Z_2, t_2; Z_3, t_3$ – волновые сопротивления и времена задержки линий Т1-Т3; C_1 – емкость элемента связи

При этом предполагается, что в исследуемой среде, помещенной между внутренним и внешними коаксиальными электродами отсутствует частотная дисперсия величины ϵ , коаксиальные линии Т1-Т3 являются идеальными линиями без потерь и искажений и работают в частотном диапазоне, соответ-

вующем основному виду колебаний в виде Т-моды [4,5].

На рис. 4 приведена схема анализа резонансных частот однородного и неоднородного резонаторов в среде MICROCAP 8. Резонансные частоты резонаторов определялись как частоты генерирования измерительного генератора V1 в виде идеального источника синусоидальной э.д.с., соответствующие максимуму напряжения в узловой точке 3 схемы анализа.

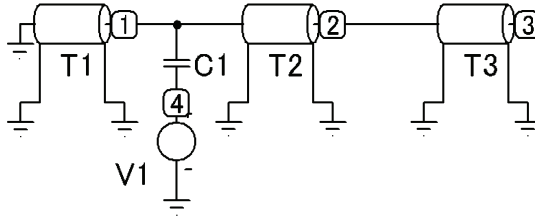


Рисунок 4 – Схема анализа неоднородного коаксиального резонатора в среде MICROCAP 8: T1-T3 – идеальные линии передачи; V1 – идеальный источник синусоидальной э.д.с.; C1 – емкость элемента связи; 1-4 – узловые точки анализа

На первом этапе был проведен анализ резонансного спектра классического четвертьволнового коаксиального резонатора. Его резонансный спектр в логарифмическом виде представлен на рис. 5.

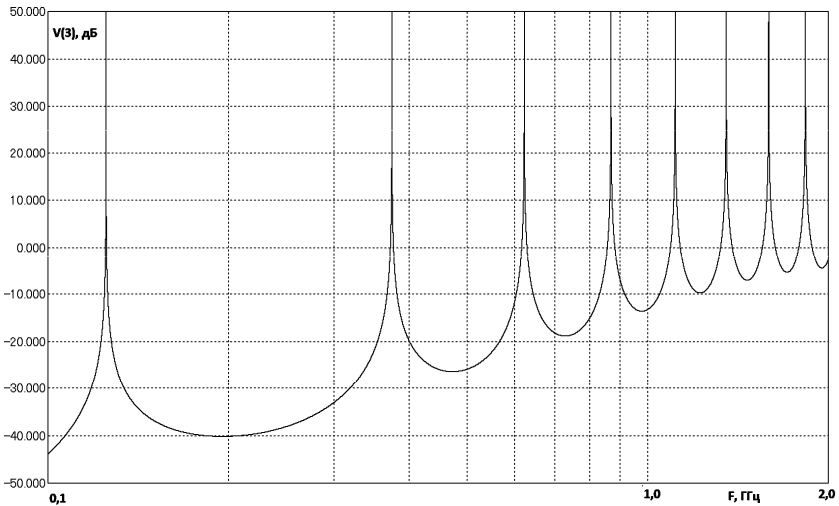


Рисунок 5 – Резонансные спектры однородного коаксиального резонатора:
 $Z1 = Z2 = Z3 = 50 \text{ Ом}$; $t = 2 \text{ нс}$; $C1 = 1 \text{ пФ}$

Как видно из анализа вида резонансного спектра, он представляет собой многочастотный спектр с частотой первого резонанса равной 0,125 ГГц, пол-

ностью совпадающий с его теоретическим (четвертьволновым) значением. Кроме этого, при анализе резонансного спектра выявляется его второй недостаток: малая частота разнеса между первым резонансом (0,125 ГГц) и вторым резонансом (0,374 ГГц).

Этот факт затрудняет использование классического четвертьволнового резонатора в виде измерительного преобразователя совместно с измерительным генератором в режиме свободных (незатухающих) колебаний.

Учитывая тот момент, что измерительный генератор должен генерировать в режимах $\epsilon = 1$ (воздух) и $\epsilon > 2$ (среда), то возможна его генерация не на частоте первого резонанса, а на частотах второго и более высших резонансов («перескок» частоты генерации).

Этот существенный недостаток классического четвертьволнового резонатора определяет его область использования для определения ϵ среды режимом не свободной генерации, а режимом исследования амплитудно-частотной характеристики.

Следует отметить, что приборы для определения амплитудно-частотных характеристик в ВЧ и СВЧ диапазонах существенно более громоздки и дороги по сравнению с частотомерами в той же частотной области (которые используются в режиме свободной генерации измерительного генератора). Кроме этого, точность отсчетов частоты резонанса серийных измерителей амплитудно-частотных характеристик существенно хуже, чем частотомеров, что и определяет недостаточную чувствительность измерений ϵ среды для малых значений влагосодержания в режиме амплитудно-частотных характеристик.

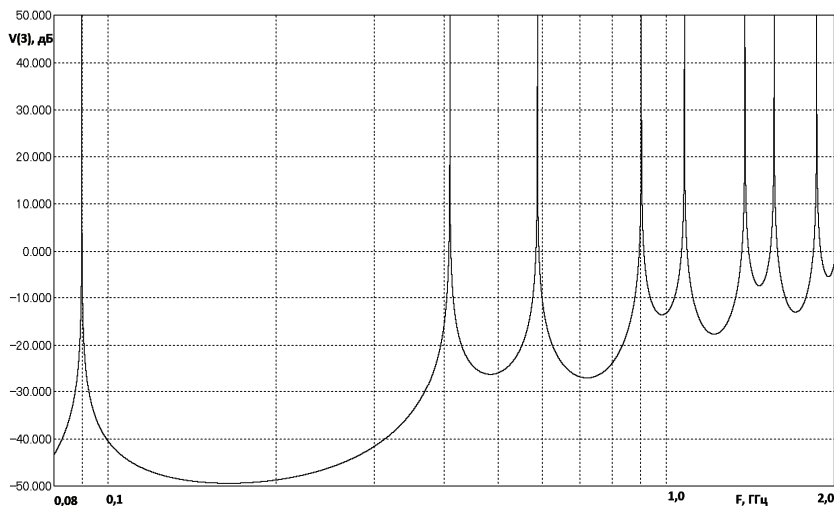


Рисунок 6 – Резонансные спектры неоднородного коаксиального резонатора:

$Z_1 = 50 \text{ Ом}; Z_2 = 50 \text{ Ом}; Z_3 = 20 \text{ Ом}; t_1 = 0,1 \text{ нс}; t_2 = 0,9 \text{ нс}; t_3 = 1 \text{ нс}; C_1 = 1 \text{ пФ}$

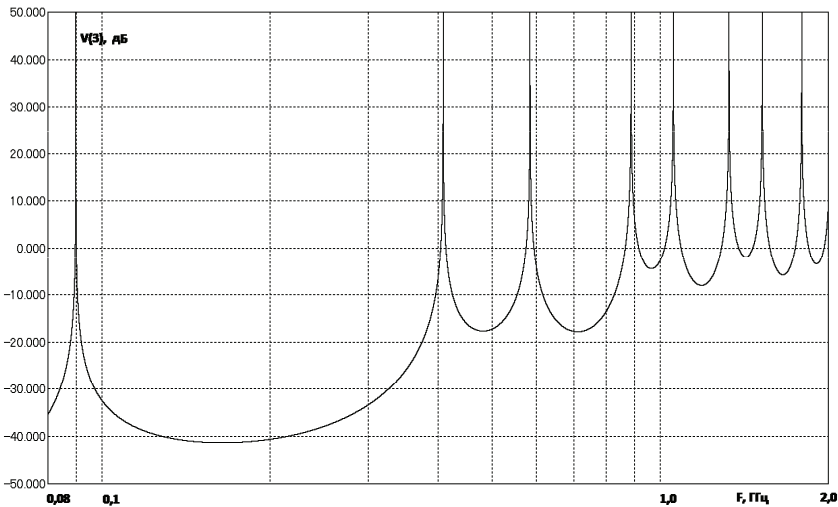


Рисунок 7 – Резонансные спектры неоднородного коаксиального резонатора:
 $Z_1 = 125 \text{ Ом}; Z_2 = 125 \text{ Ом}; Z_3 = 50 \text{ Ом}; t_1 = 0,1 \text{ нс}; t_2 = 0,9 \text{ нс}; t_3 = 1 \text{ нс}; C_1 = 1 \text{ пФ}$

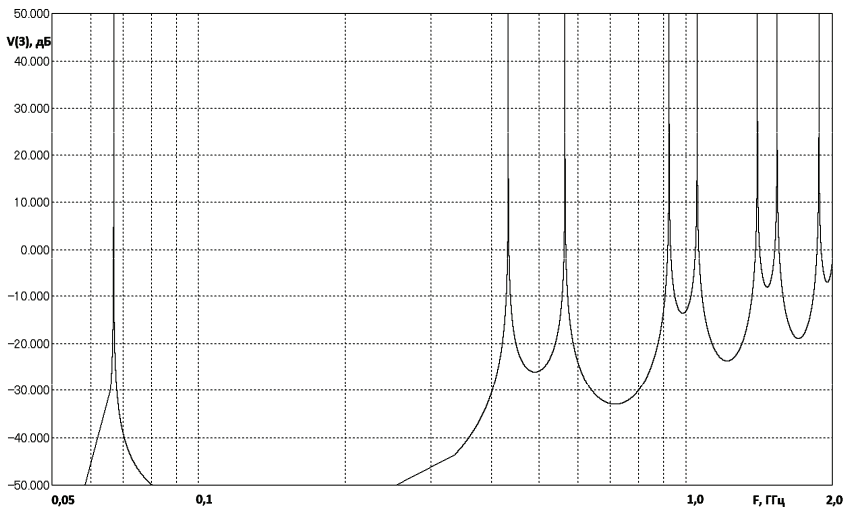


Рисунок 8 – Резонансные спектры неоднородного коаксиального резонатора:
 $Z_1 = 50 \text{ Ом}; Z_2 = 50 \text{ Ом}; Z_3 = 10 \text{ Ом}; t_1 = 0,1 \text{ нс}; t_2 = 0,9 \text{ нс}; t_3 = 1 \text{ нс}; C_1 = 1 \text{ пФ}$

Для устранения выявленных недостатков классического однородного четвертьволнового резонатора и был предложен новый тип измерительного преобразователя в виде неоднородного коаксиального резонатора.

Для сравнения его резонансного спектра с резонансным спектром клас-

сического четвертьволнового резонатора в процессе исследований была зафиксирована общая длина резонатора, и величина емкости $C1$.

Были исследованы влияния величин $Z1-Z3$ на характер резонансного спектра неоднородного резонатора рис. 6-8.

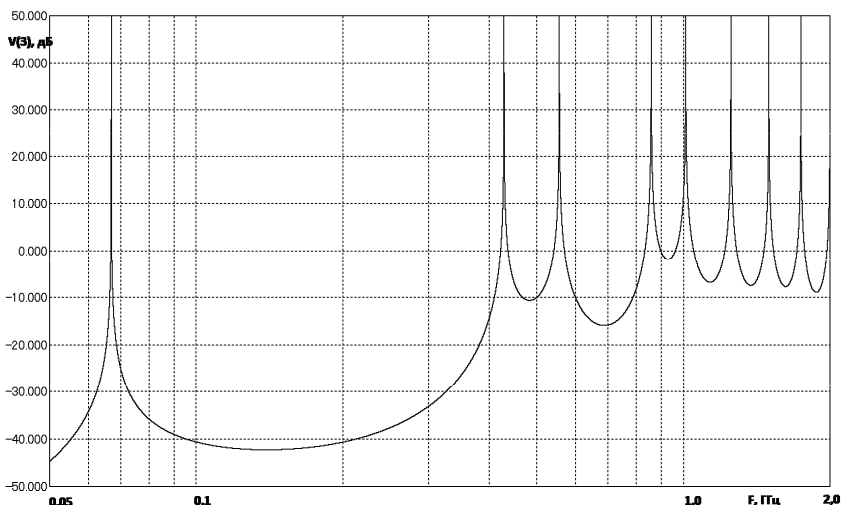


Рисунок 9 – Резонансные спектры неоднородного коаксиального резонатора:
 $Z1 = 250 \text{ Ом}; Z2 = 250 \text{ Ом}; Z3 = 50 \text{ Ом}; t1 = 0,1 \text{ нс}; t2 = 0,9 \text{ нс}; t3 = 1 \text{ нс}; C1 = 1 \text{ пФ}$

Как видно из анализа данных рис. 6, 7 уменьшение величины $Z3$ для рис. 6 и увеличение величины $Z1, Z2$ для рис.7 характеризуется одинаковыми характерами изменения резонансных спектров по сравнению со спектром классического резонатора рис. 5:

- уменьшением частоты первого резонанса (с 0,125 ГГц до 0,09 ГГц);
- увеличением частоты второго резонанса (с 0,374 ГГц до $\approx 0,4$ ГГц).

Указанная общая закономерность прослеживается и для случаев, представленных на рис. 8, 9 в еще большей степени.

Рис. 10 характеризует полученный резонансный спектр для одновременного разнонаправленного изменения $Z1-Z3$, при котором величины $Z1-Z2$ были увеличены в 5 раз, а $Z3$ была уменьшена в 5 раз по сравнению с волновым сопротивлением классического четвертьволнового резонатора.

Обобщенные результаты исследований в виде частот резонансов представлены в табл. 1.

Как видно из представленных результатов неоднородный резонатор по сравнению с классическим четвертьволновым обладает следующими преимуществами:

- существенно (в ≈ 4 раза) снижена частота первого резонанса;
- увеличена частота второго резонанса;

– существенно (≈ 5 раз) увеличен разнос частот первого и второго резонансов.

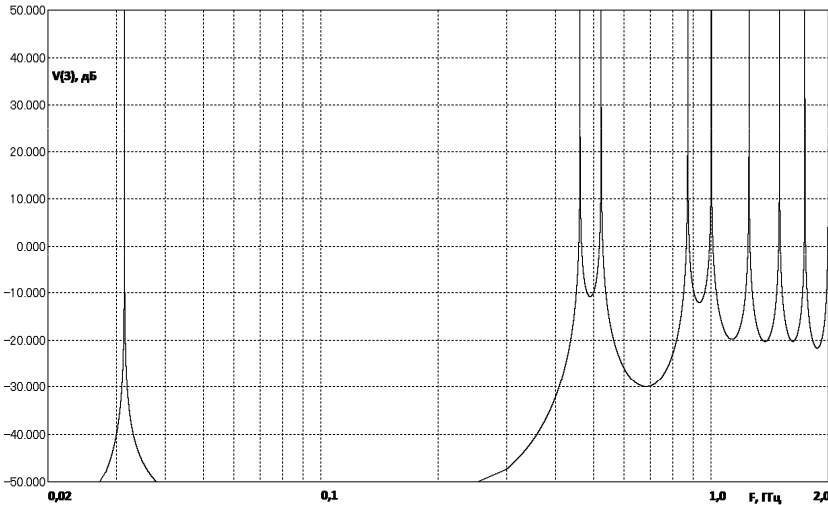


Рисунок 10 – Резонансные спектры неоднородного коаксиального резонатора: $Z1 = 250 \text{ Ом}; Z2 = 250 \text{ Ом}; Z3 = 10 \text{ Ом}; t1 = 0,1 \text{ нс}; t2 = 0,9 \text{ нс}; t3 = 1 \text{ нс}; C1 = 1 \text{ пФ}$

Таблица 1– Распределение резонансных частот

Номер резонанса	Частоты резонансов, ГГц					
	Z1/Z2/Z3, Ом, номер рисунка					
	50/50/50, рис.5	50/50/20, рис.6	125/125/50, рис.7	50/50/10, рис.8	250/250/50, рис.9	250/250/10, рис.10
1	0,125	0,09	0,09	0,067	0,067	0,031
2	0,374	0,41	0,408	0,432	0,428	0,462
3	0,623	0,588	0,584	0,565	0,556	0,542
4	0,868	0,903	0,887	0,925	0,859	0,873
5	1,111	1,078	1,054	1,05	1,011	1,003
6	1,352	1,383	1,328	1,404	1,252	1,253
7	1,591	1,56	1,523	1,541	1,489	1,500
8	1,831	1,86	1,779	1,877	1,743	1,742

Выводы.

1 Вследствие малого разноса первой и второй резонансных частот классической четвертьволновой резонатор может быть использован преимущественно в режиме определения амплитудно-частотной характеристики, так как в режиме свободной генерации измерительного генератора возможен «перескок» частот с первого на второй и последующие резонансы при заполнении резонатора средой с $\epsilon > 2$.

2 Предложен новый тип резонатора для определения диэлектрических характеристик сред в ВЧ (десятки МГц) и СВЧ (до 1,8 ГГц) диапазонах с величиной «слепой» емкости равной нулю.

3 В предложенном резонаторе существенно увеличен разнос частот первого и второго резонансов ($v \approx 5$ раз), что позволяет использовать это в режиме свободных колебаний измерительного генератора.

4 Предложенный резонатор позволяет существенно ($v \approx 4$ раза) снизить его геометрическую длину по сравнению с классическим четвертьволновым резонатором при одинаковых частотах исследований.

Список литературы: 1. Рудаков В.В., Коробко А.И., Коробко А.А. Диэлектрический метод определения влагосодержания в эмульсиях типа минеральное масло – вода с использованием электрофизической модели эмульсии инженерного типа // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 154-158. 2. Рудаков В.В., Коробко А.И., Коробко А.А., Электрофизическая модель поведения эмульсии типа минеральное масло – вода инженерного типа // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2009.-№39.-С.158-161. 3. Рудаков В.В., Коробко А.А., Повышение чувствительности измерений содержания влаги в трансформаторном масле диэлектрическим методом в резонансном режиме // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50. – С. 143-149. 4. Дж. Альтман Устройство сверхвысоких частот пер. с англ. / ред И.В. Лебедева. – М.: Мир, 1968. – 487 с. 5. А.Ф. Харвей Техника сверхвысоких частот том 1., пер с англ. / ред. В.И.Сушкевича. – М.: Сов. радио. – 1965. – 783 с.

Bibliography (transliterated): 1. Rudakov V.V., Korobko A.I., Korobko A.A. Dielektricheskii metod opredeleniya vlagosoderzhaniya v emul'siyakh tipa mineral'noye maslo – voda s ispol'zovaniyem elektrofizicheskoy modeli emul'sii inzhenerenogo tipa // Visnik NNU «KhPI». Zbirnik naukovikh prats'. Tematichniy vipusk: Tekhnika i yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU «KhPI», 2009. № 39. 154-158 Print. 2. Rudakov V.V., Korobko A.I., Korobko A.A., Elektrofizicheskaya model' povedeniya emul'sii tipa mineral'noye maslo – voda inzhenerenogo tipa // Visnik NTU «KhPI». Zbirnik naukovikh prats'. Tematichniy vipusk: Tekhnika i yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU «KhPI», 2009. № 39. 158-161 Print. 3. Rudakov V.V., Korobko A.A., Povysheniye chuvstvitel'nosti izmereniy sodержaniya vlagi v transformatornom masle diel'kometricheskim metodom v rezonansnom rezhime // Visnik NTU «KhPI». Zbirnik naukovikh prats'. Tematichniy vipusk: Tekhnika i yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. № 50. 143-149 Print. 4. Dzh. Al'tman Ustroystvo sverkhvysokikh chastot per. s angl. / red I.V. Lebedeva. Moscow: Mir, 1968. 487 Print. 5. A.F. Kharvey Tekhnika sverkhvysokikh chastot tom 1., per s angl. / red. V.I.Sushkevicha. Moscow: Sov. radio, 1965. 783 Print.

Поступила (received) 13.03.2015

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

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

Е. М. ШЕРЕГИЙ, prof., PhD, DSc., Центр микроэлектроники и нанотехнологий Жешувского университета, Польша;

С. В. ПРОХОРЕНКО, dr.hab.inż., PhD, prof., Центр микроэлектроники и нанотехнологии Жешувского университета, Польша; Национальный университет «Львовская политехника», Львов;

Э. И. ТАФТАЙ, мл. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА АМПЛИТУДУ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Приведены результаты экспериментальных исследований амплитуды волны давления с помощью волноводного пьезоэлектрического датчика при высоковольтном электрическом разряде в воде, воде с добавлением порошка Ti, керосине и керосине с добавлением порошка Ti. Выполнено сравнение экспериментальных значений амплитуды давления с расчетными. Экспериментально установлено влияние типа дисперсионной среды, концентрации дисперсной фазы и параметров разрядного контура на амплитуду давления.

Ключевые слова: электрический разряд, порошок титана, концентрация, амплитуда давления, дисперсная система.

Введение. При разработке материалов, обладающих улучшенными физико-механическими и функциональными свойствами, используется подход, который связан с диспергированием частиц порошков и уменьшением размеров элементов структуры. Основные достижения и перспективы использования высокодисперсных порошков в порошковой металлургии связаны с разработкой высокоэнергетических методов их получения при использовании высококонцентрированных потоков энергии.

Анализ основных достижений и литературы. Наиболее распространены в настоящее время механические методы обработки порошков, однако им свойственна высокая энергоемкость и загрязнение шихты продуктами износа мелющих тел [1]. Таких недостатков лишены методы обработки порошков высококонцентрированными потоками энергии, которые вызывают интенсивное протекание физико-химических процессов в зоне их локального воздействия [1]. Высокая удельная энергия и быстротечность процессов приво-

дит к формированию термодинамически неравновесных структур, вплоть до аморфных и наноструктур.

Одним из таких методов является высоковольтный электрический разряд (ВЭР) в дисперсной системе «порошок- жидкость» [2]. ВЭР в жидкости характеризуется быстрым (характерный период от $5 \cdot 10^{-6}$ до $15 \cdot 10^{-6}$ с) выделением энергии в первоначально малом объеме канала разряда, проложенного стримером, появившимся под действием высокого электрического потенциала между противостоящими электродами. ВЭР позволяет получать плотную плазму, температура которой достигает $5 \cdot 10^4$ К, давление – 1000–2000 МПа, плотность энергии – $10^8 - 10^9$ Дж/м³.

В результате высокой концентрации энергии, развиваемые в канале высокие давления и температуры приводят к быстрому ($2 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^2$ м/с) расширению канала и возникновению ударных волн, которые трансформируются в акустические с широким спектром частот, мощными гидротоками, кавитацией, электромагнитными и термическими полями [3].

Такая совокупность процессов приводят к возникновению в кристаллах порошка многочисленных трещин и микротрещин, а многократные циклические динамические нагрузки способствуют дальнейшему развитию радиальных трещин, вызываемых тангенциальными напряжениями от падающих ударных волн [4].

Установлено, что ВЭР воздействие на частицы порошков металлов и их смесей приводит к существенному измельчению (до $d_{cp} = 0,5$ мкм) и синтезу упрочняющих микро- и наноразмерных фаз карбидов, интерметаллидов (в случае обработки порошковых смесей) и боридов (в случае обработки смесей, содержащих бор) [5–7].

В качестве рабочих жидкостей в электроразрядных установках чаще всего используются техническая вода, но при необходимости используют углеводородные жидкости, в частности при обработке металлических порошков. Применение углеводородной жидкости позволяет исключить окисление частиц обрабатываемых порошков [5–7].

Поскольку возникающая при расширении канала разряда ударная волна является одним из основных факторов воздействия ВЭР, возникла необходимость теоретической оценки полей давлений в камере-реакторе при обработке порошков. Для этого была адаптирована математическая модель пространственного распределения амплитуд волны давления при ВЭР в воде [8] к условиям в дисперсной системе «порошок – углеводородная жидкость (керосин)» [5].

Однако во всех известных работах (в частности, [3-7]) не учитывалось влияние дисперсионной среды и концентрации дисперсной фазы на амплитуду давления ударной волны при ВЭР обработке порошков, что затруднило оценить корректность использования данной математической модели.

В связи с этим, **целью** данной работы является исследование влияния

состава рабочей среды при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость» на амплитуду импульсов давления.

Методика исследований. Исследования выполнялись в разрядной камере волноводным датчиком давления (ВДД) (см. рис. 1). Схема разрядного контура соответствует схеме, приведенной в работе [5].

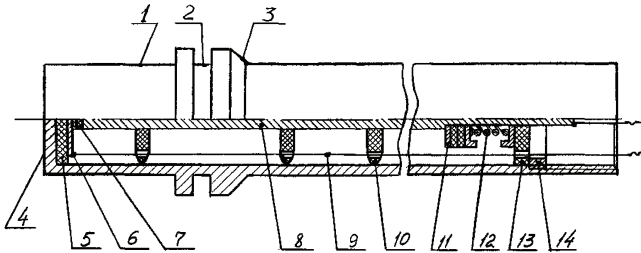


Рисунок 1 – Конструкция волноводного датчика давления: 1 – корпус; 2 – канавка; 3 – упорная поверхность; 4 – приемное доньшко; 5 – изоляционная прокладка; 6 – токосъемник; 7 – пьезоэлемент; 8 – волновод; 9 – проводник; 10 – амортизаторы; 11 – металлическая шайба; 12 – пружина; 13 – изоляционная шайба; 14 – гайка

На рис. 2 показано расположение ВДД в камере относительно элементов электродной системы, которое поддерживалось неизменным для всех рабочих сред.

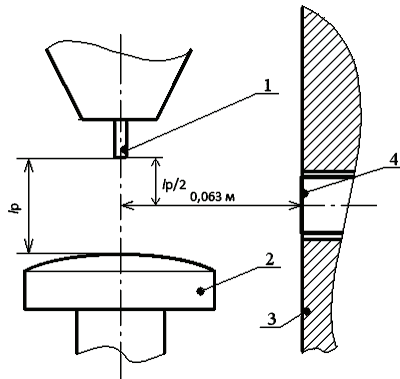


Рисунок 2 – Расположение волноводного датчика давления:
1 – электрод-анод; 2 – электрод-катод; 3 – внутренняя поверхность камеры высокого давления; 4 – приемное доньшко волноводного датчика давления

Схема соединений ВДД с запоминающим осциллографом представлена на рис. 3. В схеме емкость C номиналом 2400 пФ совместно с емкостью из-

мерительного кабеля определяла коэффициент передачи сигнала ВДД, а резистор R номиналом 3,16 кОм обеспечивал разряд емкости C в паузах между сигналами.

Определение чувствительности ВДД производилось на установке для динамической калибровки широкополосных датчиков давления [9]. Соединение ВДД с запоминающим осциллографом при калибровке на установке осуществлялось тем же измерительным кабелем с RC-цепью, что и при исследованиях в разрядной камере. Полученное значение чувствительности ВДД составило $k_d = 0,2938$ В/МПа.

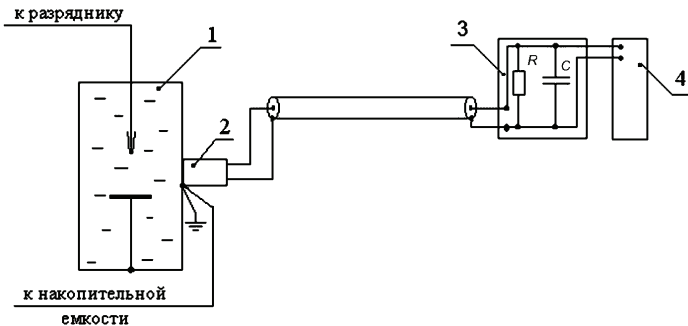


Рисунок 3 – Схема измерения импульсов давления волноводным датчиком давления:
 1 – камера высокого давления; 2 – волноводный датчик давления; 3 – RC-цепь;
 4 – запоминающий осциллограф

Исследования влияния состава рабочей жидкости на амплитуду импульсов давления выполнялись при следующих условиях:

- объем рабочей жидкости 5,5 дм³;
- в качестве рабочей среды использовались дистиллированная вода, дистиллированная вода с добавлением порошка Ti ($d_{cp} = 17$ мкм) массой 500 г (массовое соотношение Т:Ж – 1/11), керосин, керосин с добавлением порошка Ti ($d_{cp} = 17$ мкм) массой 250 и 500 г (массовое соотношение Т:Ж 1/18 и 1/9 соответственно).

Параметры контура были выбраны согласно [5] при постоянном рабочем напряжении 50 кВ:

- емкость накопителя варьировалась от 0,4 до 1,6 мкФ;
- разрядный промежуток составлял 28 мм для режимов с использованием дистиллированной воды и 12 мм для режимов с использованием керосина.

В каждом из режимов производилось 30 разрядов и для каждого разряда выполнялась запись осциллограмм разрядных тока, напряжения и осциллограммы сигнала с датчика давления.

Полученные данные усреднялись и статистически обрабатывались, определялись среднее арифметического значение амплитуды давления и значение стандартного отклонения. По осциллограммам тока и напряжения произ-

водилось определение расчетных значений амплитуды давления согласно методике, изложенной в [5, 8].

Результаты исследований. Анализ полученных при ВЭР в дистиллированной воде данных (см. рис. 4) свидетельствует о достаточной корреляции экспериментальных данных с расчетными (учитывая погрешность использованной модели в 20 %), что подтверждает корректность постановки эксперимента. Тем не менее, в диапазоне емкостей менее 1 мкФ наблюдается завышение расчетных значений давления в среднем на 36 % относительно экспериментальных. Вероятнее всего это связано с тем, что авторы математической модели [9] в процессе ее разработки не проводили собственных экспериментов с использованием емкости менее 1 мкФ, а использовали экспериментальные данные работы [10] (диапазон значений емкости от 0,24 до 1 мкФ).

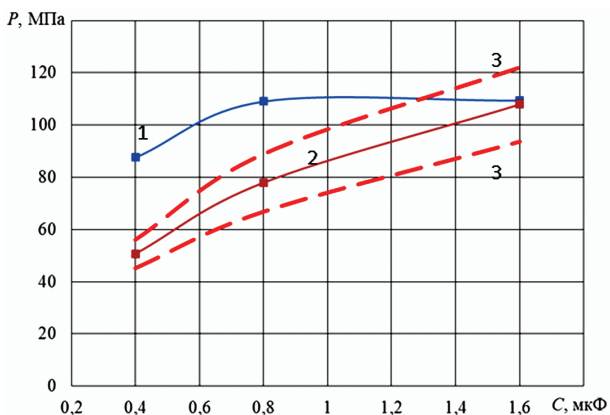


Рисунок 4 – Амплитуда давления при ВЭР в дистиллированной воде:
1 – расчетные значения амплитуды давления; 2 – экспериментальные значения амплитуды давления; 3 – стандартное отклонение экспериментальных данных

Добавление порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/11) в дистиллат не оказывает существенного влияния на экспериментально регистрируемую амплитуду давления, но способствует возрастанию доли энергии η_1 , выделенной в первом полупериоде тока ВЭР в среднем на 26 %. В свою очередь, возрастание значения η_1 привело к увеличению расчетных значений амплитуды давления в среднем на 3 %.

Экспериментальные значения амплитуды импульсов давления при ВЭР в дистиллате с добавлением порошка Ti во всем диапазоне исследований оказались ниже расчетных (см. рис. 5). При этом повышение емкости накопителя от 0,4 до 1,6 мкФ приводит к увеличению значений экспериментальной амплитуды давления с ~31 до ~111 МПа и улучшению корреляции с расчетными

ми данными.

Завышение расчетных значений давления относительно экспериментальных во всем исследованном диапазоне, может быть вызвано тем, что в реальных условиях происходит поглощение энергии волны давления частицами порошка Ti , находящимися во взвешенном состоянии в рабочей жидкости, а математическая модель [8], по которой определялись расчетные значения давления, представленные на рис. 5 (кривая 1), не учитывает взаимодействие волн давления с частицами порошка.

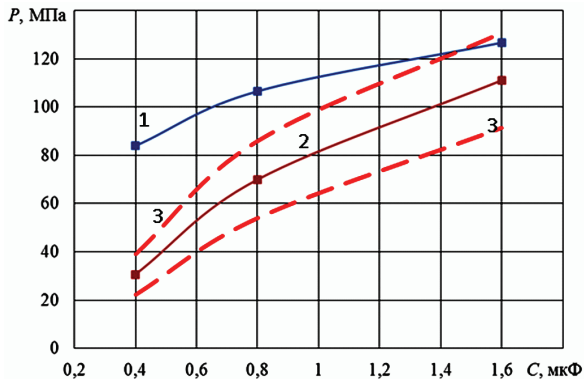


Рисунок 5 – Амплитуда давления при ВЭР в дистиллированной воде с добавлением порошка Ti (соотношение Т:Ж 1/11) : 1 – расчетные значения амплитуды давления; 2 – экспериментальные значения амплитуды давления; 3 – стандартное отклонение экспериментальных данных

Сравнение экспериментальных значений амплитуды давления при ВЭР в дистиллате (см. рис. 4, кривая 2) и ВЭР в дистиллате с добавлением порошка Ti (см. рис. 5, кривая 2) концентрацией $1/11 \text{ кг/дм}^3$ показывает их совпадение в диапазоне $C \geq 0,8 \text{ мкФ}$ в пределах погрешности, тогда как расчетные значения в аналогичных режимах различаются (см. рис 4, кривая 1 и рис. 5, кривая 1). Это может быть связано с диссипацией энергии волны давления на находящиеся во взвешенном состоянии частицах порошка Ti (что приводит к снижению амплитуды давления, регистрируемой датчиком) и возрастанием доли энергии, выделенной в первом полупериоде тока (что приводит к возрастанию расчетного значения амплитуды давления).

Использование керосина в качестве рабочей среды привело к значительному (в ~ 6 раз) снижению амплитуды давления, по сравнению с дистиллатом, регистрируемой датчиком, относительно расчетных значений (см. рис. 6). На наш взгляд, это может быть обусловлено отсутствием учета вязкости рабочей жидкости в математической модели [5, 8]. При этом, также как и в дистиллате, сохраняется тенденция увеличения амплитуды давления при увеличении емкости накопителя в диапазоне от 0,4 до 1,6 мкФ.

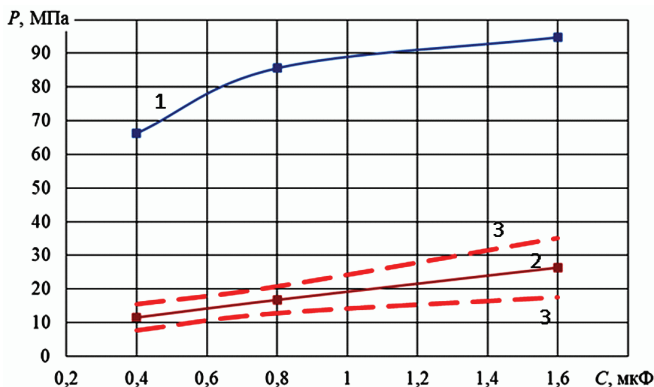


Рисунок 6 – Амплитуда давления при ВЭР в керосине: 1 – расчетные значения амплитуды давления; 2 – экспериментальные значения амплитуды давления; 3 – стандартное отклонение экспериментальных данных

Коэффициент вариации V_d (отношение среднеквадратического отклонения выборки и среднего значения амплитуды давления) при ВЭР в керосине значительно превышает (в среднем в 2,5 раза) коэффициент вариации при ВЭР в дистиллате с аналогичными параметрами контура (см. табл. 1), что может быть связано с увеличением разброса геометрических положений канала разряда по отношению к ВВД

Таблица 1 – Коэффициент вариации значений амплитуды давления при ВЭР в различных средах

Дисперсионная среда	Концентрация дисперсной фазы	С, мкФ	V_d
Дистиллат	–	0,4	0,10
Дистиллат	–	0,8	0,14
Дистиллат	–	1,6	0,13
Дистиллат	1/11	0,4	0,27
Дистиллат	1/11	0,8	0,22
Дистиллат	1/11	1,6	0,17
Керосин	–	0,4	0,33
Керосин	–	0,8	0,23
Керосин	–	1,6	0,33
Керосин	1/9	0,8	0,63
Керосин	1/18	0,4	0,54
Керосин	1/18	0,8	0,39
Керосин	1/18	1,6	0,21

Также следует отметить, что в режимах с аналогичными уровнями параметров контура и дисперсионными средами, отличающихся лишь наличием, либо отсутствием дисперсной фазы порошка Ti , коэффициент вариации

также отличается (в среднем в 1,9 раза больше для режимов с Ti в дистиллате и в 1,3 раза больше для режимов с Ti в керосине), что свидетельствует о влиянии слоя порошка Ti на геометрическое положение канала разряда.

Дальнейшая проверка корректности применения адаптированной математической модели гидродинамических характеристик ВЭР в воде [5] к случаю ВЭР в керосине выполнялась путем увеличения индуктивности разрядного контура с 0,83 до 2,76 мкГн, при неизменных остальных параметрах контура: $U = 50$ кВ, $C = 0,8$ мкФ, $l_p = 12$ мм, так как согласно [8], амплитуда давления обратно пропорциональна квадратному корню значения индуктивности разрядного контура. Установлено, что увеличение индуктивности в $\sim 3,3$ раза с 0,83 до 2,76 мкГн привело к снижению расчетного значения давления с 85,59 до 47,28 МПа (в $\sim 1,81$ раза, то есть $1,81 \approx \sqrt{3,3}$), а экспериментального – с 16,75 до 10,05 МПа (в $\sim 1,67$ раз), что свидетельствует о корректном учете влияния индуктивности разрядного контура в адаптированной математической модели [5]. Различие в ~ 6 раз между экспериментальными и расчетными значениями амплитуды давления в керосине при варьировании индуктивностью разрядного контура сохраняется.

Далее было выполнено исследование ВЭР в керосине с добавлением порошка Ti (соотношение T:Ж 1/9) при режиме с параметрами $U = 50$ кВ, $C = 0,8$ мкФ, $L = 0,8$ мкГн, обработка в котором показывает наилучшие среди рассмотренных режимов результаты с точки зрения сочетания диспергирования и карбидизации порошка Ti [5 – 7]. Установлено, что добавление в керосин порошка Ti при соотношении масс твердой и жидкой фаз 1/9 приводит снижению амплитуды давления относительно аналогичного режима ВЭР в керосине с $\sim 16,8$ до ~ 5 МПа, то есть в $\sim 3,36$ раза (см. рис. 7). Стандартное отклонение выборки, соответствующей данному значению, составляло 1,08 МПа. При этом, в отличие от описанного выше случая ВЭР в дистиллате, добавка порошка Ti в рабочую среду приводит к снижению расчетного значения амплитуды давления в режиме с $C = 0,8$ мкФ с ~ 86 до ~ 23 МПа ($\sim 3,7$ раза). Такие изменения амплитуды давления связаны со снижением пробивного напряжения с ~ 45 до ~ 16 кВ вследствие значительного уменьшения эффективного значения межэлектродного промежутка.

С учетом установленного влияния частиц порошка в исследуемых дисперсионных средах на амплитуду волны давления ВЭР (см. рис. 5 и 7), представляло интерес исследовать влияние образующихся в процессе обработки мелкодисперсных частиц порошка Ti и нанougлерода различных аллотропных форм, находящихся во взвешенном состоянии [5–7, 11].

Для этого было произведена серия в 100 разрядов (см. рис. 7), после чего были записаны и статистически обработаны амплитуды давления последующей серии разрядов. При этом значение амплитуды давления снизилось до ~ 2 МПа. Стандартное отклонение соответствующей выборки составляло 1,45 МПа, то есть отличие от предыдущего значения выходило за пределы

статистической погрешности. Такое изменение амплитуды давления может быть объяснено тем, что уже после 100 разрядов возрастает количество мелкодисперсных частиц порошка Ti , и нанougлерода различных аллотропных форм [11], время оседания которых превышает паузу между разрядами.

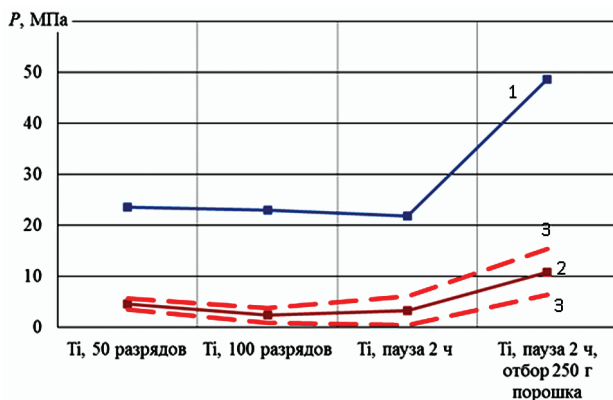


Рисунок 7 – Амплитуда давления при ВЭР в керосине с добавлением порошка Ti : 1 – расчетные значения амплитуды давления; 2 – экспериментальные значения амплитуды давления; 3 – стандартное отклонение экспериментальных данных

После паузы длительностью 2 часа, достаточной для полного оседания частиц порошка Ti на дно камеры, была выполнена серия разрядов (см. рис. 7), которая показала возрастание амплитуды давления до ~ 3 МПа, увеличилось и стандартное отклонение соответствующей выборки (до $\sim 2,81$ МПа). Такие изменения амплитуды давления после образования мелкодисперсных частиц и их последующего оседания подтверждают гипотезу о диссипации энергии волны давления на частицах порошка

Снижение содержания порошка Ti в дисперсионной среде в 2 раза (соотношение твердой и жидкой фаз 1/18) приводит к значительному увеличению амплитуды давления до ~ 11 МПа, то есть в ~ 2 раза (см. рис. 7). При этом расчетное значение давления также возрастает до ~ 49 МПа (также в ~ 2 раза). На взгляд связано это с тем, что уменьшение количества порошка Ti в разрядной камере увеличивает эффективное значение межэлектродного промежутка, что приводит к возрастанию пробивного напряжения до ~ 43 кВ.

При варьировании емкостью накопителя от 0,4 до 1,6 мкФ с случае ВЭР в керосине с порошком Ti (соотношение Т:Ж 1/18) значения амплитуды давления (см. рис. 8, кривая 2) снижаются относительно ВЭР в керосине в аналогичных режимах (см. рис. 6, кривая 2) в среднем в $\sim 1,8$ раза. Так, экспериментальные значения амплитуды давления в режиме с $C = 1,6$ мкФ при ВЭР в керосине и в керосине с добавлением Ti (соотношение Т:Ж 1/18) составляют ~ 26 и ~ 13 МПа соответственно (различие на 13 МПа), тогда как стандартные

отклонения соответствующих выборок составляют 8,84 и 2,76 МПа соответственно.

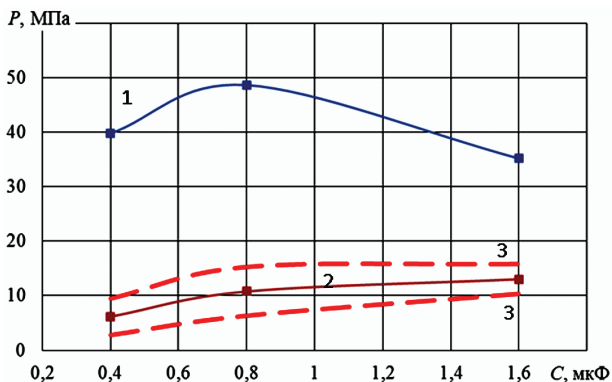


Рисунок 8 – Амплитуда давления при ВЭР в керосине с добавлением порошка Ti (соотношение T:Ж 1/18) : 1 – расчетные значения амплитуды давления; 2 – экспериментальные значения амплитуды давления; 3 – стандартное отклонение экспериментальных данных

Выводы. Экспериментально установлена связь амплитуды давления с составом рабочей среды при ВЭР в дисперсной системе «порошок – жидкость» - типом дисперсионной среды, концентрацией дисперсной фазы и параметрами разрядного контура. Установлено, что добавка в дистиллат порошка Ti концентрацией 1/11 приводит к увеличению доли энергии, выделенной в первом полупериоде тока в канале разряда, но не оказывает существенного влияния на экспериментально регистрируемую амплитуду давления. Добавка в керосин порошка Ti с массовым соотношением твердой и жидкой фаз 1/9 приводит к снижению амплитуды давления на ВДД в ~ 3 раза, а с соотношением 1/18 – в $\sim 1,5$ раза по сравнению со случаем ВЭР в керосине. Ранее адаптированная модель гидродинамических характеристик ВЭР в дисперсных системах «порошок металла – керосин» должна быть доработана с учетом роли вязкости рабочей среды, емкости накопителя в диапазоне менее 1 мкФ и отклонения экваториальной плоскости разряда.

Список литературы. 1. Сизоненко, О.Н. Перспективные процессы изготовления порошковых материалов / О.Н. Сизоненко, А.И. Ивлиев, Г.А. Баглюк. – Николаев: НУК, 2014. – 376 с. 2. Infimovsky, Yu.Yu. Prospects for obtaining fine powder using a pulsed electrical discharge in liquid / Yu.Yu. Infimovsky, M.A. Strokov // Engineering Journal: Science and Innovation. – 2013. – № 8(20). – P. 30-45. 3. Гулый, Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. / Г.А. Гулый. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 4. Бакуль В.Н. Способ дробления сверхтвердых материалов / В.Н. Бакуль, Ю.И. Микитин и др. // Электронная обработка материалов. – 1976. – Вып. 2. – С. 18-22. 5. Sizonenko O. N. Variation in the Particle Size of Fe-Ti-B₄C Powders Induced by High-voltage Electrical Discharge / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, A. I. Raichenko et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2012. – Vol. 51, iss. 3. – P. 129-136. 6. Sizonenko O. Plasma technologies for obtainment

of composite materials dispersion hardened by nanostructured particles / O. Sizonenko, V. Tregub, N. Pristash, A. Zaichenko, A. Torpakov // International virtual journal for science, technics and innovations for the industry. – Year IX Issue 1/2015. – P. 32-35. **7.** Sizonenko O. N. Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, E. I. Taftai et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – Vol. 52, iss. 5-6. – P. 247–253. **8.** Шамко, В. В. Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда / В. В. Шамко, В. В. Кучеренко. – Николаев: Ин-т импульсных процессов и технологий НАН Украины, 1991. – 51 с. – (Препринт / НАН Украины, Ин-т импульсных процессов и технологий; № 20). **9.** Теляшов, Л. Л. Установка для динамической калибровки широкополосных датчиков давления / Л. Л. Теляшов, Ю. С. Чеканов, Е. К. Гнатенко // Физические основы электрогидравлической обработки материалов. – К.: Наукова думка, 1978. – С. 160-165. **10.** Окунь, И. Э. Исследование волн сжатия, возникающих при импульсном разряде в воде / И. Э. Окунь // Журн. техн. физики. – 1971. – № 41, вып. 2. – С. 292-301. **11.** Богуславский, Л.З. Электровзрывной метод получения фуллеренов / Л.З. Богуславский, И.П. Гук, Н.И. Кускова, С.А. Хайнацкий, А.Н. Щербак // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 4. – С. 30-34.

Bibliography (transliterated): **1.** Sizonenko, O.N., A.I. Ivliev and G.A. Bagljuk. Perspektivnye processy izgotovlenija poroshkovykh materialov. Nikolaev: NUK, 2014. Print. **2.** Infimovsky, Yu.Yu. and M.A. Stokov «Prospects for obtaining fine powder using a pulsed electrical discharge in liquid» Engineering Journal: Science and Innovation. No. 8(20). 2013. 30–45. Print. **3.** Gulyj, G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snyh tehnologij. Kiev: Naukova dumka, 1990. Print. **4.** Bakul', V.N. et. al. «Sposob droblenija sverhtverdyh materialov» Jelektronnaja obrabotka materialov. Vol. 2. 1976. 18-22. Print. **5.** Sizonenko, O. N. et al. "Variation in the Particle Size of Fe–Ti–B₄C Powders Induced by High-voltage Electrical Discharge." Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Vol. 51, Issue 3. 2012. 129–136. Print. **6.** Sizonenko, O. et al. «Plasma technologies for obtainment of composite materials dispersion hardened by nanostructured particles.» International virtual journal for science, technics and innovations for the industry. Year IX, Issue 1/2015. 2015. 32–35. Print. **7.** Sizonenko, O. N. et al. «Dispersion and Carburization of Titanium Powders by Electric Discharge.» Powder Metallurgy and Metal Ceramics. Vol. 52, Issue 5-6. 2013. 247–253. Print. **8.** Shamko, V. V. and V. V. Kucherenko. Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschetov jenergeticheskikh i gidrodinamicheskikh parametrov podvodnogo iskrovogo razrjada. Nikolaev: In-t impul'snyh processov i tehnologij NAN Ukrainy, 1991. Print. **9.** Teljashov, L. L., Ju. S. Chekanov and E. K. Gnatenko «Ustanovka dlja dinamicheskoy kalibrovki širokopolosnyh datchikov davlenija.» Fizicheskie osnovy jelektrogidravlicheskoy obrabotki materialov. Kiev: Naukova dumka, 1978. 160-165. Print. **10.** Okun', I. Je. «Issledovanie voln szhatija, vznikajushhij pri impul'snom razrjade v vode.» Zhurn. tehn. fiziki. No. 41, Issue 2. 1971. 292-301. Print. **11.** Boguslavskij, L.Z. et al. «Jelektrovzryvnoj metod polucheniya fulerenov» Jelektronnaja obrabotka materialov. No.4. 2002. 30-34. Print.

Поступила (received) 12.03.2015

А.Ю. ЧЕРНУХИН, мл. науч. сотр., аспирант, НТУ «ХПИ»;
В.В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ОСОБЕННОСТИ СТРИМЕРНОЙ КОРОНЫ СО СТЕРЖНЕВЫХ МОЛНИЕПРИЕМНИКОВ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований стримерной короны со стержневых молниеприемников, в предгрозовый период. На основании статистической обработки результатов установлена эмпирическая зависимость количества одиночных стримеров в коронном разряде от напряженности электрического поля, в котором находится молниеприемник. Доказано существенное отличие в характере зависимости для стержня квадратного сечения с плоской вершиной и стержня кругового сечения с заостренной вершиной.

Ключевые слова: предгрозовые условия, стримерная корона, число единичных стримеров, напряженность электрического поля, стержневой молниеприемник.

Введение. Предметом исследования, результаты которого представлены далее, являются электрофизические процессы, сопровождающие коронный разряд в воздухе с металлических стержней, находящихся в постоянном электрическом поле. Известно [1], что при некоторых условиях коронный разряд, несмотря на постоянство напряжения, горит в виде периодических импульсов тока с частотами повторения до 10^4 Гц, если коронирует анод, и 10^6 Гц, если коронирует катод. В работе [1] также приведены конкретные результаты для случаев стержня над плоскостью при обеих полярностях стержня. Эти данные были приняты нами в качестве отправной точки, и они таковы:

– для положительного острия радиусом $r = 0,17$ мм на расстоянии $d = 3,1$ см от плоского катода корона появляется при напряжении $V_k \approx 5$ кВ и вплоть до напряжения $V_1 \approx 9,3$ кВ имеет импульсный характер. У краев интервала частота повторения мала, а в середине достигает максимальной величины 6,5 кГц. Средний ток нарастает до 1 мкА при V_1 . Подобные импульсы автор [1] называет «вспышечной короной». (физика процесса обусловлена возникновением стимеров, поэтому, такую корону целесообразно называть «стримерной») В интервале от V_1 до $V_2 \approx 16$ кВ импульсов нет. Идет стационарный ток, который нарастает от 1 до 10 мкА при V_2 . Начиная от V_2 и до напряжения искрового пробоя всего промежутка $V_n \approx 29$ кВ разряд снова протекает в форме импульсов. Частота их монотонно возрастает от малой величины до 4,5 кГц. Нарастающий с V средний ток достигает в предпробойной стадии 100 мкА. Ток между импульсами вспышечной короны падает не до нуля, он обладает и постоянной составляющей;

– для отрицательного острия с идентичной геометрией в некотором интервале напряжений и средних токов, начиная с точки зажигания V_k , ток име-

© А.Ю. Чернухин, В.В. Князев, 2015

ет импульсный характер. Частота импульсов больше, чем в положительной короне, достигает 100 кГц при силе тока 20 мкА, а сами импульсы короче (10^7 с). Пиковый ток достигает 10 мА. Импульсы имеют регулярный характер. При повышении напряжения импульсы исчезают, и стационарная корона существует вплоть до искрового пробоя промежутка.

В современной литературе активно обсуждается влияние объемного заряда короны на эффективность молниезащиты [2 - 4]. В тоже время, особенности процесса коронирования со стержневых молниеприемников в предгрозовой обстановке недостаточно экспериментально исследованы. Авторами в работах [5 - 7] предпринята попытка изучить эти особенности в условиях приближенных к естественным. В рамках данной статьи представлены результаты, касающиеся зависимости характеристик стримерной короны со стержневого молниеприемника от напряженности электрического поля, в котором он находится. В определенном смысле, эти результаты являются дополнением к результатам работы [7].

Основная часть

Цель работы: экспериментальное исследование частоты возникновения одиночных стримеров для стержневого молниеприемника в зависимости от напряженности электрического поля.

Результаты экспериментальных исследований. При приближении грозового облака, за счет сопутствующего электрического поля, на молниеприемнике индуцируется электрический заряд, что обуславливает повышение напряженности поля на конце молниеприемника и появление коронного разряда. При некотором критическом значении напряженности электрического поля возникают стримерные вспышки. Определение критического значения напряженности электрического поля, при котором возникают стримерные вспышки, и характер их поведения при изменении уровня напряженности электрического поля представлены в работе [7].

Моделирование исследуемого процесса осуществлено на высоковольтном испытательном стенде ВВС-1.2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», описанном в работе [5]. Исследования проведены на стержневых молниеприемниках, размещавшихся между двумя параллельными металлическими плоскостями. Размеры плоскостей: нижняя – 4,02 x 6,56 м, верхняя – 3,63 x 5,22 м. Рассмотрен вариант, когда нижняя плоскость, на которой устанавливается стержень, заземлена. Верхняя плоскость потенциальная – на нее подавалось высокое напряжение (ВН) отрицательной полярности. Расстояние (S) между плоскостями было фиксированным равным 5 м. Соответственно, с изменением подаваемого напряжения (до 180 кВ), изменялось значение напряженности электрического поля в промежутке (до 36 кВ/м). Стержень устанавливался на нижней заземленной плоскости на изоляционной подставке и был присоединен к плоскости через сопротивление шунта ($R_{ш} = 75 \text{ Ом}$). С помощью

шунта и осциллографа регистрировался ток, протекающий в исследуемом промежутке. На второй канал осциллографа подавалось напряжение с омического делителя, установленного непосредственно на выходе ПВУ. Коэффициент деления примененного делителя равен 10^4 . Чувствительность схемы измерения силы тока короны определяется величиной сопротивления шунта 75 Ом.

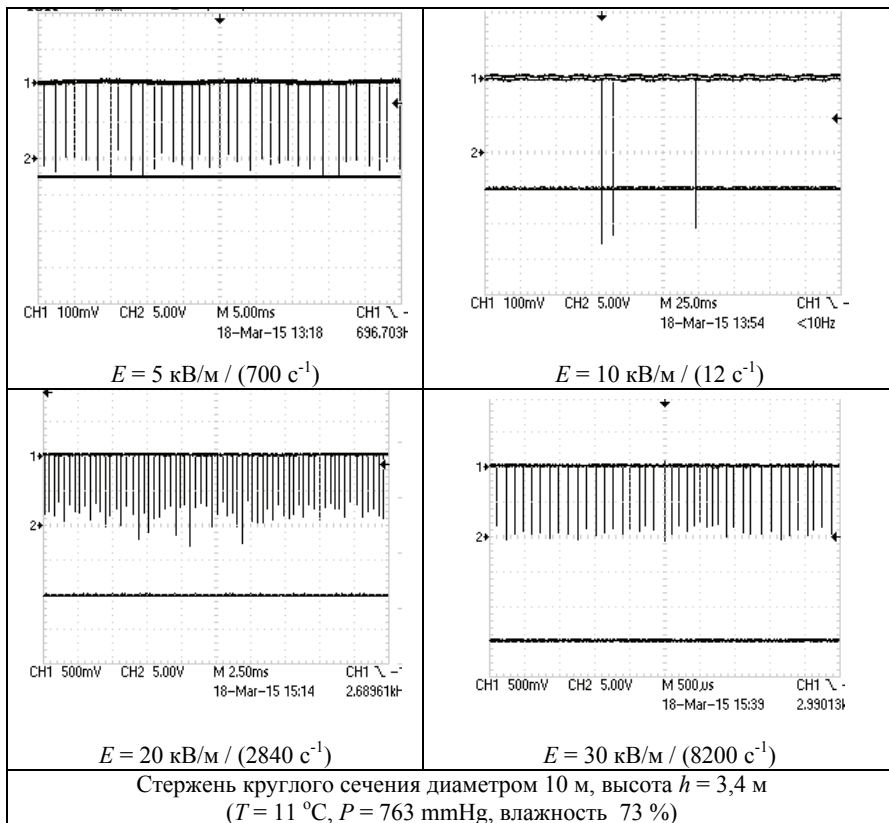


Рисунок 1 – Осциллограммы, иллюстрирующие зависимость частоты следования стримеров от напряженности электрического поля для заостренного стержня

Учитывая статистический характер процессов коронирования, для каждой исследуемой совокупности параметров проводилось не менее 10 последовательных измерений. Что обеспечило возможность осуществить усреднение результатов и оценить величину их разброса. Для иллюстрации результатов на рис. 1 и 2 представлены типовые осциллограммы стримерной короны для случаев кругового стержня (диаметром 10 мм) с заостренной вершиной и

стержня квадратного сечения с плоской вершиной, соответственно. В скобках возле значений напряженности E поля указано рассчитанная частота следования для конкретной осциллограммы.

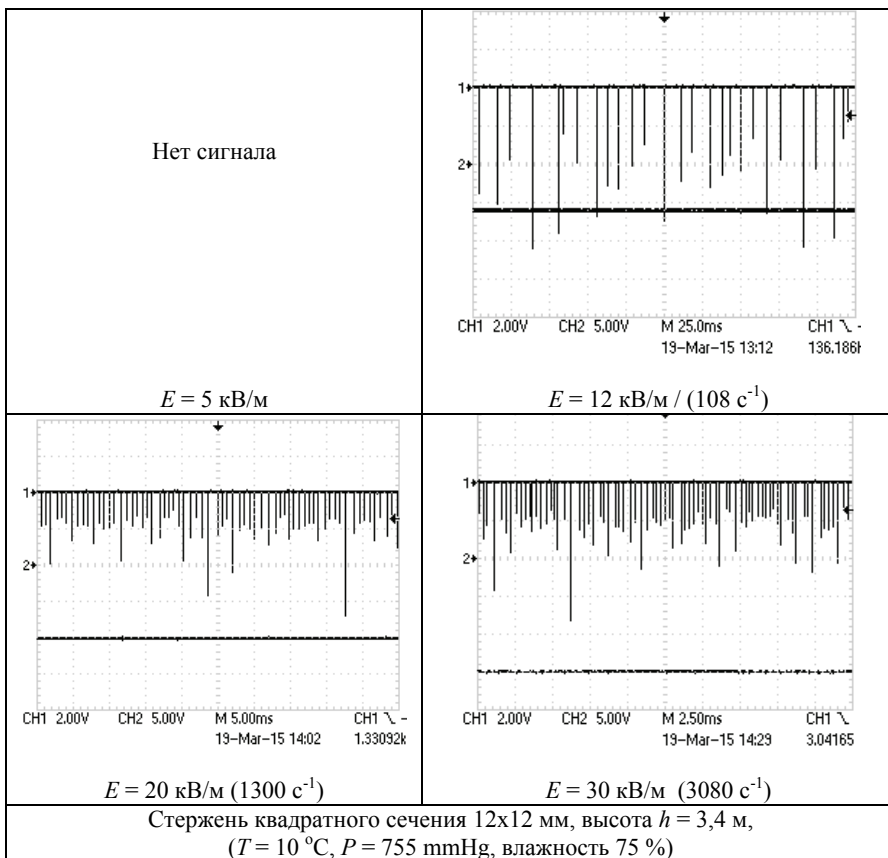


Рисунок 2 – Осциллограммы, иллюстрирующие зависимость частоты следования стримеров от напряженности электрического поля для квадратного стержня

Зависимости среднего арифметического числа стримерных вспышек от напряженности электрического поля для исследуемых вариантов стержней представлены на рис. 3. Результаты статистической обработки полученных в ходе экспериментов данных представлены в табл. 1 и 2, соответственно для заостренного и квадратного стержней. Следует отметить, что форма тока единичного стримера для всех рассмотренных случаев практически не изменялась. Изменение касалось только пикового значения импульса. Из представленных рисунков и таблиц можно сделать такие умозаключения:

Таблица 1 – Результаты измерений частоты следования для заостренного стержня

$U_{зар.}$, кВ	E , кВ/м	Среднее арифм. N , 1/с	СКО
14,5	2,9	9,16	1,31
20	4	276	7,02
25	5	636	12,58
30	6	78	15,97
50	10	136.6	59,53
75	15	1460	145,60
100	20	2656	322,20
120	24	3940	523,70
150	30	6720	627,66

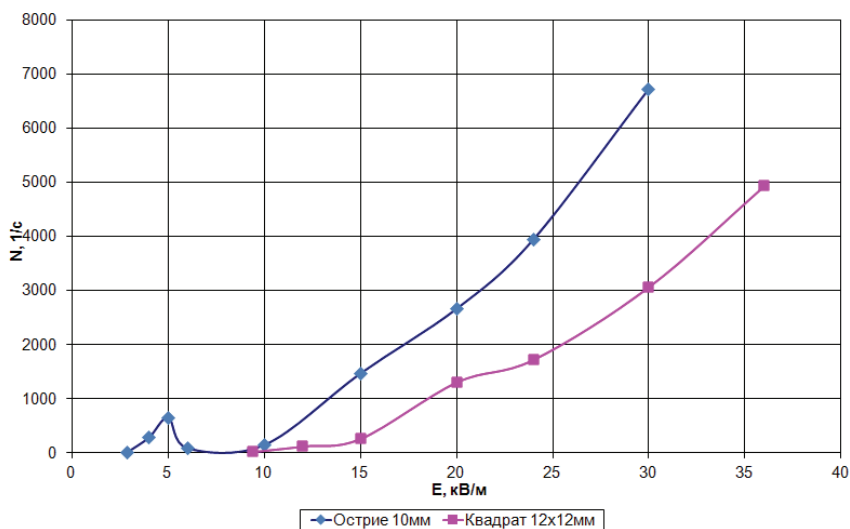


Рисунок 3 – Зависимость частоты следования стримеров от напряженности электрического поля

Таблица 2 – Результаты измерений частоты следования для квадратного стержня

$U_{зар.}$, кВ	E , кВ/м	Среднее арифм., c^{-1}	СКО
47	9.4	14.7	1.40
60	12	116	4.81
75	15	258	4.74
100	20	1302	20.54
120	24	1720	23.85
150	30	3064	32.77
180	36	4930	93.15

– заостренный стержень начинает реагировать с напряженности электрического поля 3 кВ/м, а стержень квадратного сечения не ранее чем с 9 кВ/м;

– коронный разряд с заостренного стержня в диапазоне E от 6-10 кВ/м прекращается, что в полной мере соответствует процитированным выше во введении результатам работы [1];

– при напряженности E превышающей 10 кВ/м число стримеров с заостренного стержня примерно вдвое больше, чем с квадратного;

– среднее пиковое значение силы тока отдельного стримера выше для квадратного стержня, например, при напряженности $E \approx 10$ кВ/м это значение составляет 5 мА для заостренного стержня и 60 мА для квадратного стержня. По мере увеличения напряженности E это различие уменьшается, так при $E \approx 30$ кВ/м, пиковое значения импульса силы тока составляет 13 мА и 26 мА, соответственно;

– значение среднеквадратичного отклонения (СКО), при прочих одинаковых условиях для случая квадратного стержня на порядок меньше, чем для случая заостренного стержня.

Полученные результаты планируется использовать при создании индикатора грозовой активности.

Выводы

Определены функциональные зависимости частоты следования стримеров с металлических стержней длиной 3,4 м круглого сечения с заостренной вершиной и квадратного сечения с плоской вершиной.

Установлено, что частота следования стримеров для случая стержня квадратного сечения имеет детерминированный характер: с ростом напряженности E частота следования монотонно возрастает с коэффициентом близким к $0,25 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$ м.

Значение среднеквадратичного отклонения (СКО), при прочих одинаковых условиях для случая квадратного стержня на порядок меньше, чем для случая заостренного стержня.

Установлено, что коронный разряд с заостренного стержня в диапазоне напряженности электрического поля от 6 кВ/м до 10 кВ/м прекращается, а частота следования с ростом напряженности достигает 6 кГц, что в полной мере соответствует процитированным выше во введении результатам работы [1].

Несмотря на существенное отличие между проведенными опытами в рамках этой работы и теми, что описаны в работе [1], наблюдается не только хорошее качественное, но и количественное совпадение результатов.

Результаты получены в рамках выполнения научно-исследовательской работы (ГР №0115U000611), которая выполняется по заказу Министерства образования и науки Украины в 2015-2016 годах.

Список литературы: 1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер . – 1987. 2. Базелян Э.М. Эффект объемного заряда короны в молниезащите / Э.М. Базелян // Сборник докладов IV Международной конференции по молниезащите. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2014. – С. 8-23. 3. Lightning protection / Ed. By Vernon Coorey // IET Power and Energy Series 58, UK, London.: 2010, P.1070. 4. Стишков Ю.К. Экспериментальное исследование импульсного коронного разряда в воздухе / Ю.К. Стишков, А.В. Самусенко, А.С. Субботский и др. // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, вып. 11. – С. 21-28. 5. Князев В.В. Характеристики стримерной короны при постоянном напряжении на молниеприемниках с различными формами вершин и поперечных сечений / В.В. Князев, П.Н. Мельников, А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2012. – Вып. 21. – С. 111-117. 6. Чернухин А.Ю. Квазистатическое развитие коронного разряда с молниеприемников / А.Ю. Чернухин, В.В. Князев, П.Н. Мельников // Вестник НТУ «ХПИ» Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2013. – Вып. 60. – С. 122-127. 7. Чернухин А.Ю. параметры импульсной короны на металлических стержнях в сильном электрическом поле / А.Ю. Чернухин // Вестник НТУ «ХПИ» Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2014. – Вып. 50. – С. 155-160.

Bibliography (transliterated): 1. Rajzer Yu.P. Fizika gazovogo razryada. Yu.P. Rajzer. 1987 Print. 2. Bazelyan E.M. Effekt ob#emnogo zaryada korony v molniezaschite. E.M. Bazelyan. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoj konferencii po molniezaschite. Sankt Petersburg: Izd-vo Politehnicheskogo un-ta, 2014. 8-23 Print. 3. Lightning protection. Ed. By Vernon Coorey. IET Power and Energy Series 58, UK, London.: 2010, P.1070 Print. 4. Stishkov Yu.K. Eksperimental'noe issledovanie impul'snogo koronnogo razryada v vozduhe. Yu.K. Stishkov, A.V. Samusenko, A.S. Subbotskij i dr. Zhurnal tehnichejskoj fiziki. 2010. Vol. 80.11. 21-28 Print. 5. Knyazev V.V. Harakteristiki strimernoj korony pri postoyannom napryazhenii na molniepriemnikah s razlichnymi formami verшин i poperechnyh sechenij. V.V. Knyazev, P.N. Mel'nikov, A.Yu. Chernuhin. Vestnik NTU «KhPI». Tem. vyp. «Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij». 2012. Vol. 21. 111-117 Print. 6. Chernuhin A.Yu. Kvazistaticheskoe razvitie koronnogo razryada s molniepriemnikov. A.Yu. Chernuhin, V.V. Knyazev, P.N. Mel'nikov. Vestnik NTU «KhPI» Tem. vyp. «Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij». 2013. Vol. 60. 122-127 Print. 7. Chernuhin A.Yu. parametry impul'snoj korony na metallicheskih stержnyah v sil'nom elektricheskom pole. A.Yu. Chernuhin. Vestnik NTU «KhPI» Tem. vyp. «Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij». 2014. Vol. 50. 155-160 Print.

Поступила в редколлегию 15.04.2015

С. Ю. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ»;
В. В. ВОЛОХІН, канд. техн. наук, доцент, СумДУ, Суми;
І. М. ДЯГОВЧЕНКО, аспірант, СумДУ, Суми;
Д. М. МАКУХА, асистент, СумДУ, Суми;

АКТУАЛЬНІСТЬ УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НАПРУГИ ПРИ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Розглянуто і проаналізовано вплив на роботу приладів обліку електричної енергії показників якості напруги, зокрема відхилення напруги від нормованих значень, коливання напруги, несинусоїдальність напруги, несиметрія напруги, провали напруги, імпульси напруги та тимчасові перепади напруги. Визначено основні причини виникнення таких відхилень якості електроенергії, зроблено висновки щодо їх впливу на прилади обліку електричної енергії, розглянуто основні методи їх врахування.

Ключові слова: прилад обліку, лічильник електроенергії, електрична енергія, напруга, несиметрія, відхилення, вплив, похибка.

Вступ. Електрична енергія як товар використовується у всіх сферах життєдіяльності людини, володіє сукупністю специфічних властивостей і бере безпосередню участь при створенні інших видів продукції, впливаючи на їх якість. У зв'язку з цим питання точності вимірювання електричної енергії в електричних розподільних мережах є актуальним.

Для вимірювання електричної енергії в системах електропостачання в даний час застосовуються як індукційні, так і електронні лічильники електроенергії. Причому останні найчастіше будуються на основі аналогово-цифрових перетворювачів з використанням мікропроцесорних обчислювачів, тобто в процесі обчислення електроенергії застосовується дискретизація вимірювань за часом і квантування вхідних сигналів, пропорційних поточних значень струму і напруги на навантаженні, що неминує породжує похибка обчислення енергії.

В якості електронних приладів обліку сьогодні використовуються спеціально розроблені лічильники, що забезпечують з досить високою точністю визначення поточного значення електроенергії $W(t)$ у порівнянні з індукційними лічильниками, у відповідності з виразом:

$$W(t) = \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt, \quad (1)$$

де $u(t)$ – миттєве значення напруги навантаження; $i(t)$ – миттєве значення струму навантаження; t – поточний час вимірювання.

У структурній схемі такого лічильника як перемножувача миттєвих зна-

чень $u(t)$ і $i(t)$ використовується імпульсний інтегратор, імпульсний перемножуючий пристрій, цифровий лічильник імпульсів, що дає можливість забезпечити дуже низьку сумарну похибку вимірювання поточного значення електроенергії (порядку декількох десятих часток відсотка) в умовах високого рівня вищих гармонік на кратних частотах 50 Гц, аж до частот у кілька десятків кілогерц, і використовувати його для зразкового вимірювання електричної енергії.

Точність обліку електричної енергії, яка проходить через контрольно-вимірювальний пристрій (лічильник), багато в чому залежить від параметрів якості електричної енергії (ЯЕ). Кожен електроприймач призначений для роботи при певних параметрах електричної енергії: номінальній напрузі, частоті, струмі і т. п., тому для його нормального функціонування повинна бути забезпечена необхідна ЯЕ. Таким чином, якість електричної енергії визначається сукупністю її характеристик, при яких електроприймачі (ЕП) і контрольно-вимірювальні прилади можуть нормально працювати і виконувати закладені в них функції.

На сьогодні в Україні діє стандарт ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», який встановлює норми і показники ЯЕ в електромережах загального призначення однофазного та трифазного змінного струму промислової частоти у мережах, до яких приєднуються електричні мережі, що перебувають у власності різних споживачів електричної енергії, або приймачі електричної енергії (точки загального приєднання). Норми ЯЕ, що встановлюються стандартом, є обов'язковими і служать для забезпечення електромагнітної сумісності електричних мереж систем електропостачання загального призначення і електричних мереж приймачів електричної енергії (споживачів).

Одним з найважливіших показників якості є напруга. Згідно з ГОСТ 13109-97, встановлюються наступні показники ЯЕ по напрузі:

- усталене відхилення напруги δU_y ;
- розмах зміни напруги δU_i ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$;
- коефіцієнт несиметрії напруги при зворотній послідовності K_{2U} ;
- коефіцієнт несиметрії напруг при нульовій послідовності K_{0U} ;
- тривалість провалу напруги Δt_n ;
- імпульсна напруга $U_{\text{имп}}$;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}U}$.

При визначенні значень деяких показників якості стандартом вводяться допоміжні параметри електроенергії:

- інтервал між змінами напруги $\Delta t_{i,i+1}$;
- глибина провалу напруги δU_n ;
- частота появи провалів напруги F_n ;

- тривалість імпульсу за рівнем 0,5 його амплітуди $\Delta t_{\text{имп}0,5}$;
- тривалість тимчасової перенапруги $\Delta t_{\text{пер}U}$.

Відхилення напруги. Відхилення напруги визначається різницею між дійсним U і номінальним значеннями напруги $U_{\text{ном}}$, В:

$$\delta U = U - U_{\text{ном}}. \quad (2)$$

Усталене відхилення напруги:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100\%, \quad (3)$$

де U_y – стале (діюче) значення напруги за інтервал усереднення.

В електричних мережах однофазного змінного струму діюче значення напруги визначається як значення напруги основної частоти $U_{(1)}$ без урахування вищих гармонійних складових напруги, а в електричних мережах трифазного струму – як діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти $U_{1(1)}$. Стандартом нормуються відхилення напруги на виводах приймачів електричної енергії. Нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги дорівнюють відповідно ± 5 та ± 10 % від номінального значення.

Відхилення напруги від номінальних значень відбуваються через добові, сезонні і технологічні зміни електричного навантаження споживачів; зміни потужності компенсуючих установок; зміни схем та параметрів електричних мереж; регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистем.

При відхиленні напруги від номінального більш ніж на 10 % виникає суттєва зміна похибки лічильника. Зазвичай доводиться рахуватися з впливом зниженої напруги. При коефіцієнті завантаження індукційного лічильника менше 0,3 зниження напруги призводить до зміни похибки в негативну сторону через послаблення дії компенсатора тертя. При коефіцієнтах завантаження вище 0,3 зниження напруги призводить до зміни похибки вже в позитивний бік. Це відбувається через зменшення гальмівної дії робочого потоку в колах напруги.

Коливання напруги. Коливання напруги викликаються різкою зміною навантаження на аналізованій ділянці електричної мережі, наприклад, після включенням асинхронного двигуна з великою кратністю пускового струму (7-8 разів), технологічними установками зі швидкозмінним режимом роботи, що супроводжуються поштовхами активної та реактивної потужності - такими як, привод реверсивних прокатних конвеєрів, зварювальні установки, дугові сталеплавильні печі і т. п. Коливання напруги характеризуються двома показниками:

- розмахом зміни напруги δU_t ;
- дозою флікера P_t .

Розмах зміни напруги δU_i обчислюють за формулою:

$$\delta U_i = \frac{(U_i - U_{i+1})}{U_{ном}} 100\%,$$

де U_i, U_{i+1} – значення наступних один за іншим екстремумів (або екстремуму і горизонтальної ділянки) обвідної середньоквадратичних значень напруги, відповідно до рис. 1.

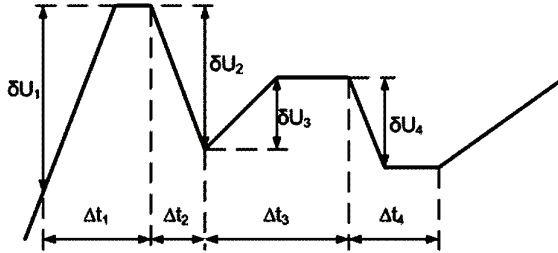


Рисунок 1 – Коливання напруги

Частота повторення змін напруги $F_{\delta U_i}$, (1/с, 1/хв) визначається за виразом:

$$F_{\delta U_i} = \frac{m}{T}, \quad (4)$$

де m – число змін напруги за час T ; T – інтервал часу виміру, приймається рівним 10 хв.

Якщо дві зміни напруги відбуваються з інтервалом менше 30 мс, то їх розглядають як одне. Інтервал часу між змінами напруги дорівнює

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i,i+1} - \Delta t_i.$$

Несинусоїдальність напруги. В процесі вироблення, перетворення, розподілу і споживання електроенергії мають місце спотворення форми синусоїдальних струмів і напруг. Несинусоїдальність форми струму в основному визначається електроприймачами з нелінійною характеристикою. До них, зокрема, відносяться вентиляльні перетворювачі, електродугові сталеплавильні печі, випрямні установки, газорозрядні лампи, зварювальне обладнання та ін. Вимірювання електроенергії при наявності вищих гармонік проводиться з похибкою, знак якої може бути як позитивним, так і негативним. При відхиленні частоти на 1 Гц похибка лічильника може досягати 0,5 %.

Відомо, що будь-яку несинусоїдальну функцію $f(\omega t)$ (наприклад, див. рис. 2), що задовольняє умови Діріхле, можна представити у вигляді суми постійної величини і нескінченного ряду синусоїдальних величин з кратними частотами (гармонійні складові). Синусоїдальна складова, період якої дорівнює періоду несинусоїдальної періодичної величини, називається основною (першою) гармонікою. Інші складові синусоїди з частотами з другої по n -у

називають вищими гармоніками.

Несинусоїдальність напруги характеризується наступними показниками:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги.
- коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги.

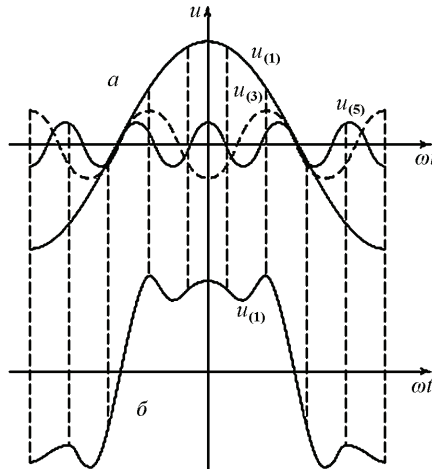


Рисунок 2 – Несинусоїдальність напруги: a – гармонічного складу напруги (1, 3, 5-а гармоніки), b – результуюча (спотворена форма кривої)

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U визначається за виразом:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} 100\%, \quad (5)$$

де $U_{(n)}$ – діюче значення n -ої гармонійної складової напруги; В, n – порядок гармонійної складової напруги; N – порядок останньої з обліковуються гармонійних складових напруги, стандартом встановлюється $N = 40$; $U_{(1)}$ – діюче значення напруги основної частоти, В.

Коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги дорівнює:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} 100 \%, \quad (6)$$

Для обчислення необхідно визначити значення напруги окремих гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням. Нормально допустимі та гранично допустимі значення K_U є нормованими величинами.

Несиметрія напруги. Найбільш поширеними джерелами несиметрії напруг у трифазних системах електропостачання є такі споживачі електроенер-

гії, симетричне трифазне навантаження яких або неможливе, або недоцільне з техніко-економічних міркувань. До таких установок відносяться індукційні та дугові електричні печі, тягові навантаження залізничних составів, спеціальні однофазні навантаження, освітлювальні установки. Несиметричні режими напруги в електричних мережах мають місце також в аварійних ситуаціях – при обриві фази або несиметричних коротких замиканнях. Несиметрія напруг характеризується наявністю в трифазній електричній мережі напруг зворотної або нульової послідовностей, що є значно меншими за величиною, ніж відповідні складові напруги прямої (основної) послідовності.

Несиметрія трифазної системи напруг виникає внаслідок накладення на систему прямої послідовності системи напруг зворотної послідовності, що призводить до змін абсолютних значень фазних і міжфазних напруг (рис. 3).

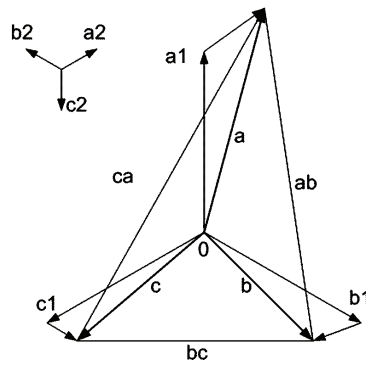


Рисунок 3 – Векторна діаграма напруг прямої та зворотної послідовності

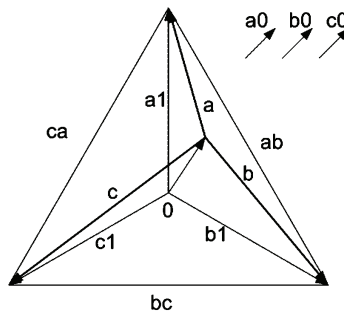


Рисунок 4 – Векторна діаграма напруг прямої і нульової послідовності

Крім несиметрії, що викликається напругами системи зворотної послідовності, може виникати несиметрія від накладення на систему прямої послідовності системи напруг нульової послідовності. В результаті зсуву нейтралі трифазної системи виникає несиметрія фазних напруг при збереженні симет-

ричної системи міжфазних напруг (рис. 4).

Несиметрія напруг характеризується наступними показниками:

- коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності;
- коефіцієнтом несиметрії напруг за нульовою послідовністю.

Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності дорівнює:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(n)}}{U_{1(1)}} 100 \%, \quad (6)$$

де $U_{2(1)}$ – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В; $U_{1(1)}$ – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти, В.

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю дорівнює:

$$K_{2U} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)}}{U_{1(1)}} 100 \%, \quad (7)$$

де $U_{0(1)}$ – діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В.

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю проводять у чотирихпроводниковій мережі. Нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в точці загального приєднання до електричних мереж складають 2,0 і 4,0 %.

Нормовані значення коефіцієнта несиметрії напруги за нульовою послідовністю в точці загального приєднання до чотирихпроводникової електричної мережі 0,38 кВ також дорівнюють 2,0 і 4,0 %.

Варто відзначити, що несиметрія навантажень незначною мірою впливає на похибку лічильника. Деяке збільшення похибки може мати місце при відсутності навантаження в одній фазі, що практично виключено. Вирівнювання навантажень по фазах має за мету не тільки зменшення втрат, але і підвищення точності обліку. На трьохелементний лічильник несиметрія навантажень не впливає. В сучасних електронних приладах обліку дана проблема вирішена практично повністю.

Провали напруги. До провалів напруги належить раптова значна зміна напруги в точці електричної мережі нижче рівня 0,9, за якою слідує відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня через проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд (рис. 5).

Характеристикою провалу напруги є його тривалість – Δt_n , яка дорівнює

$$\Delta t_n = t_k - t_n, \quad (8)$$

де t_n і t_k – початковий і кінцевий моменти часу провалу напруги.

Провал напруги характеризується також глибиною провалу напруги – різницею між номінальним значенням напруги і мінімальним діючим значенням напруги, вираженої в одиницях напруги або у відсотках від номінального

значення. Провал напруги обчислюється за виразами

$$\delta U_n = U_{ном} - U_{мин} \quad (9)$$

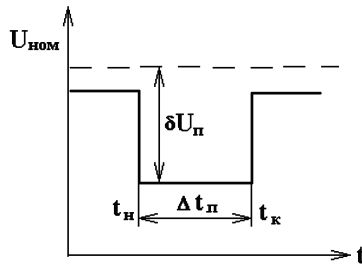


Рисунок 5 – Провал напруги

Імпульс напруги і тимчасова перенапруга. Спотворення форми кривої напруги може відбуватися за рахунок появи високочастотних імпульсів при комутаціях в мережі, роботі розрядників і т. д. Імпульс напруги - різка зміна напруги в точці електричної мережі, за якою слідує відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня. Величина спотворення напруги при цьому характеризується показником імпульсної напруги (рис. 6).

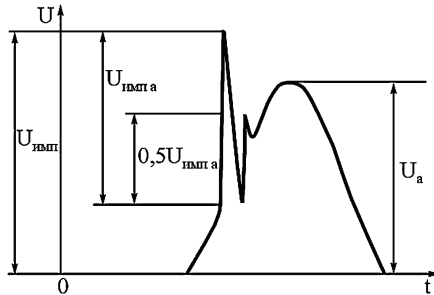


Рисунок 6 – Параметри імпульсної напруги

Імпульсна напруга у відносних одиницях дорівнює:

$$\delta U_{имп} = \frac{U_{имп}}{\sqrt{2}U_{ном}}, \quad (10)$$

де $U_{имп}$ – значення імпульсної напруги, В.

Амплітудою імпульсу називається максимальне миттєве значення імпульсу напруги. Тривалість імпульсу – це інтервал часу між початковим моментом імпульсу напруги і моментом відновлення миттєвого значення напруги до початкового або близького до нього рівня. Показник імпульсна напруга стандартом не нормується.

Значні стрибки напруги можуть призводити до пошкодження складових

елементів лічильників електроенергії та виникнення порушень в їх роботі.

Тимчасова перенапруга – це підвищення напруги в точці електричної мережі вище $1,1 \cdot U_{ном}$ тривалістю більше 10 мс, яке виникає у системах електропостачання при комутаціях або коротких замиканнях (рис. 7).

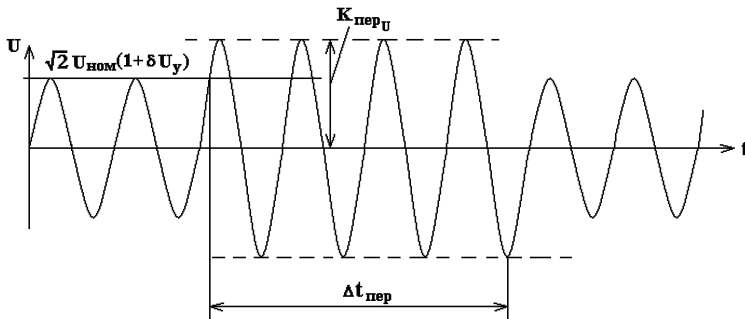


Рисунок 7 – Тимчасова перенапруга

Тимчасова перенапруга характеризується коефіцієнтом тимчасової перенапруги ($K_{перU}$): це величина, що дорівнює відношенню максимального значення огинаючої амплітудних значень напруги за час існування тимчасової перенапруги до амплітуді номінального напруги мережі.

$$K_{перU} = \frac{U_{aMax}}{\sqrt{2} U_{ном}} \quad (11)$$

Тривалістю тимчасової перенапруги називається інтервал часу між початковим моментом виникнення тимчасової перенапруги і моментом її зникнення.

$$\Delta t_{перU} = t_{кпер} - t_{нпер} \quad (12)$$

Коефіцієнт тимчасової перенапруги стандартом також не нормується. В середньому за рік в точці приєднання можливі близько 30 часових перенапруг. При обриві нульового провідника в трифазних електричних мережах напругою до 1 кВ, що працюють з глухозаземленою нейтраллю, виникають тимчасові перенапруги між фазою і землею. Рівень таких перенапруг при значній несиметрії фазних навантажень може досягати значень міжфазової напруги, а тривалість кількох годин.

Висновки. Встановлений і розширений робочі діапазони лічильника повинні мати відповідно значення $0,90 \div 1,10 U_{ном}$ і $0,8 \div 1,15 U_{ном}$. У відповідності до результатів досліджень, граничні похибки для установленого діапазону з його допустимим 10 % відхиленням від номінальної напруги в найгіршому випадку для класів точності 0,2S; 0,5S; 1,0 і 2,0 складають відповідно 0,2; 0,4; 1,0; 1,5. Однак більшість лічильників розраховані на роботу в розширеному діапазоні напруги, а це означає, що їх граничні похибки при відхиленнях на-

пруги понад $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$ (до $1,15 \cdot U_{\text{ном}}$) і нижче $0,9 \cdot U_{\text{ном}}$ (до $0,8 \cdot U_{\text{ном}}$) можуть мати межі в 3 рази більші: 0,6; 1,2; 3,0 і 4,5. Таким чином якість електричної енергії, зокрема якість напруги є дуже важливим параметром, від контролю якого на пряму залежить точність вимірювання і обліку електричної енергії контрольно-вимірювальними приладами.

Список літератури: 1. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с. 2. Pietro Vincenzo Barbaro. Behaviour of reactive energy meters in polluted power systems / Pietro Vincenzo Barbaro, Antonio Cialiotti, Valentina Cosentino at all. – XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development, September, 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil. – 6 с. 3. Причины нарушения учета электроэнергии и неисправности индукционных счетчиков. – Режим доступа : <http://electricalschool.info/main/286-prichiny-naruseniija-ucheta.html>. – Дата звертання : 20 березня 2015. 4. Влияние колебаний напряжения на работу электрооборудования. – Режим доступа: http://studopedia.ru/5_76337_vliyanie-kolebaniy-napryazheniya-na-rabotu-elektrooborudovaniya.html. – Дата звертання : 21 березня 2015. 5. Попов А.П. Влияние широтно-импульсной модуляции на погрешность индукционных счетчиков электроэнергии и на потери в асинхронном двигателе / А. П. Попов, А. О. Чузулев, А. А. Горшенков та ін. – Режим доступа: <http://habarok.info/vlianie.shtm>. – Дата звертання : 21 березня 2015. 6. Петров В. М. О влиянии бытовых электроприемников на работу смежных электротехнических устройств. / В. М. Петров, Е. Ф. Щербаков, М. В. Петрова. // Промышленная энергетика. – 1998. – № 4. 7. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с. 8. ГОСТ13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». 9. ГОСТ Р 52322–2005. Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Ч. 21: Статические счетчики активной энергии классов точности 1 и 2. – М.: Стандартинформ, 2005. 10. Гуртовцев А. Погрешности электронных счетчиков. Исследование и оценка / А. Гуртовцев // Новости электротехники. Информационно-справочное издание. – 2007. – № 43. – С. 26-27.

Bibliography (transliterated): 1. Zhelezko Ju. S. Poteri elektrojenergii. Reaktivnaja moshhnost. Kachestvo jelektrojenergii: Rukovodstvo dlja prakticheskikh raschetov. Moscow: JeNAS, 2009. Print. 2. Pietro Vincenzo Barbaro. Behaviour of reactive energy meters in polluted power systems. Pietro Vincenzo Barbaro, Antonio Cialiotti, Valentina Cosentino at all. XVIII IMEKO World Congress Metrology for a Sustainable Development, September, 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil. Print. 3. Prichiny narusheniija ucheta jelektrojenergii i neispravnosti indukcionnyh schetchikov. Web. <http://electricalschool.info/main/286-prichiny-naruseniija-ucheta.html>. 20 March 2015. 4. Vliyanie kolebaniy naprjazhenija na rabotu elektrooborudovaniija Web. http://studopedia.ru/5_76337_vliyanie-kolebaniy-napryazheniya-na-rabotu-elektrooborudovaniya.html. 21 March 2015. 5. Popov A.P. Vliyanie shirotno-impul'snoj moduljacji na pogreshnost' indukcionnyh schetchikov jelektrojenergii i na poteri v asinhronnom dvigatele. Web. <http://habarok.info/vlianie.shtm>. 21 March 2015. 6. Petrov V. M. O vlijanii bytovykh jelektropriemnikov na rabotu smezhnykh jelektrotehnicheskikh ustrojstv. Promyshlennaja jenergetika. 1998. No 4 Print. 7. Zhezhenko I.V. Pokazateli kachestva jelektrojenergii i ih kontrol na promyshlennyh predpriatijah. Moscow: Jenergoatomizdat, 1986. Print. 8. GOST13109-97 «Normy kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija». 9. GOST R 52322–2005. Apparatura dlja izmereniija jelektricheskoi jenergii peremennogo toka. Chastnye trebovanija. Ch. 21: Statische schetchiki aktivnoj jenergii klassov tochnosti 1 i 2. – Moscow.: Standartinform, 2005. 10. Gurtovcev A. Pogreshnosti jelektronnyh schetchikov. Issledovanie i ocenka Novosti jelektrotehniki. Informacionno-spravocnoe izdanie. 2007. No 43. 26-27 Print.

Поступила (received) 19.03.2015

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХП»;
Д. М. БАКЛАЙ, аспірант, НТУ «ХП»

АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ГАЗАМИ, РОЗЧИНЕНИМИ В МАСЛІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ, ПРИ РІЗНИХ ТИПАХ ДЕФЕКТІВ

Досліджена тіснота кореляційного зв'язку між газами, розчиненими в маслі силових трансформаторів при різних типах дефектів. Установлена наявність значимого зв'язку як між газами характерними для даного типу дефекту, так і між супутніми газами. Показано, що кількість газів, що мають значиму кореляцію між собою, зростає не тільки з ростом енергії, що виділяється при даному типі дефекту, але й від часу розвитку дефекту. Отримані результати є підставою для розробки статистичних моделей дефектів, які повинні адекватно враховувати як кількісну, так і якісну відмінність у вмісті газів в маслі при різних типах дефектів.

Ключові слова: хроматографічний аналіз розчинених у маслі газів, тип дефекту, кореляція між газами, дуговий розряд, термічний перегрів, комбінований дефект.

Постановка проблеми. При визначенні граничних значень концентрацій розчинених у маслі газів за допомогою методів статистичних рішень, принципово важливим є адекватно оцінити значення параметрів законів розподілу газів для бездефектного й дефектного устаткування. Якщо, для бездефектного стану трансформаторів, значення концентрацій газів, а, отже, і параметри закону розподілу будуть в основному визначатися умовами експлуатації, сортом масел і конструктивними особливостями устаткування, то для дефектного устаткування принципово важливий облік типу прогнозованого дефекту. Подібного роду облік має на увазі не тільки кількісне, але і якісне співвідношення між отриманими розподілами концентрацій газів і їх дійсним вмістом у пробі масла для даного типу дефекту. Забезпечення якісної відповідності між розподілами концентрацій газів і їх вмістом у пробі масла для даного типу дефекту принципово не можливо без аналізу кореляційних зв'язків між газами при різних типах дефекту.

Аналіз публікацій. На цей час процеси газоутворення в трансформаторному маслі фундаментально досліджені й, знайшли широке відбиття у відкритих джерелах, наприклад в [1]. У роботах [2-5] наведені результати досліджень вмісту газів в маслі високовольтного устаткування з різними типами дефектів. Однак, більшість із наведених досліджень зводилося до оцінки рівнів концентрацій газів, їх процентного вмісту в пробі масла й аналізу значень відносин пар газів при різних рівнях енергетичних впливів. У роботі [6] виконані дослідження тісноти стохастичного зв'язку між газами, розчиненими в

© О. В. Шутенко, Д. М. Баклай, 2015

маслі бездефектних трансформаторів. У той же час питання, пов'язані з аналізом кореляційних зв'язків між газами в дефектних трансформаторах освітлені недостатньо, що й послужило приводом для написання даної статті.

Ціль статті – У статті приводяться результати аналізу тісноти кореляційного зв'язку між газами, розчиненими в маслі силових трансформаторів, при різних типах дефектів.

Метод вирішення. Основним завданням виконуваних досліджень є виявлення тих газів, які мають значимий статистичний зв'язок притому або іншому типу дефектів. Тобто виявити ті гази концентрації, яких змінюються закономірно й ті гази концентрації, яких змінюються не залежно від концентрацій інших газів при даному типі дефекту. У якості вихідних даних використовувалися значення концентрацій розчинених у маслі газів, по 215 трансформаторах, у яких за результатами експлуатаційних випробувань був виявлений дефект, і встановлено його тип.

Оцінка тісноти кореляційного зв'язку між двома газами виконувалася як:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

де r – коефіцієнт парної кореляції; x_i, y_i – поточні значення концентрацій газів; \bar{x}, \bar{y} – середні значення концентрацій газів; n – обсяг вибірових значень.

Рішення про значимість кореляційного зв'язку між двома газами, ухвалювалося на основі порівняння розрахованого значення коефіцієнта парної кореляції з його критичним значенням, при заданому рівні довірчої ймовірності $\alpha = 0,05$ і при числі ступенів свободи $n - 2$ [7]. Зв'язок уважався значимим, якщо розрахункове значення коефіцієнта парної кореляції перевищувало відповідне критичне значення.

Однак коефіцієнт парної кореляції характеризує лише ступінь лінійного статистичного зв'язку між випадковими величинами й не може характеризувати зв'язок через моменти більш високого порядку. Інформацію про нелінійний зв'язок між випадковими величинами можна одержати, використовуючи значення емпіричного кореляційного відношення:

$$\hat{\eta}_{y/x} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_j} (\tilde{y}_{ij} - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

де n – обсяг вибірки; $\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \tilde{y}_{ij}$ – умовне середнє, отримане для значень x_i ;

при $j = \overline{1, m_j}$; $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i$ – загальне середнє по всіх експериментальних точках; \tilde{y}_{ij} – результати спостережень в i -тій експериментальній точці.

Розрахунки значень коефіцієнтів парної кореляції, а також прямого й зворотного кореляційного відносин виконувався за допомогою, розробленої на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХП» програми «KORREL» [8]. Оскільки рішення про наявність або відсутність зв'язку між розчиненими в маслі газами, при використанні в якості критерію тісноти зв'язку значення коефіцієнта парної кореляції, збіглися з аналогічними рішеннями при використанні значень кореляційного відношення, то для скорочення обсягу матеріалу, у даній статті приводяться тільки значення коефіцієнтів парної кореляції.

Аналіз результатів. Для зручності аналізу результати розбиті на три групи. У першу групу входять значення коефіцієнтів парної кореляції між газами при дефектах електричного типу, у другу між газами при дефектах термічного типу, у третю між газами при комбінованих дефектах. Результати аналізу наведено в табл. 1-3. Жирним шрифтом виділені значення коефіцієнтів парної кореляції, які перевищують критичні.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів парної кореляції в трансформаторах з дефектами електричного типу

Тип дефекту	Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂ S
Часткові розряди ρ _{крит} , 10, 0,95=0,576	H ₂	1,00	0,976	0,896	0,0152	-	0,970
	CH ₄	0,976	1,00	0,971	0,049	-	0,9997
	C ₂ H ₆	0,896	0,971	1,00	0,084	-	0,976
	C ₂ H ₄	0,0152	0,049	0,084	1,00	-	0,054
	C ₂ H ₂	-	-	-	-	1,00	-
	C ₂ H ₂ S	0,970	0,9997	0,976	0,054	-	1,00
Дуговий розряд ρ _{крит} , 9, 0,95=0,632	H ₂	1,00	0,726	0,539	0,408	0,915	0,820
	CH ₄	0,726	1,00	0,392	0,883	0,899	0,965
	C ₂ H ₆	0,539	0,392	1,00	0,468	0,605	0,586
	C ₂ H ₄	0,408	0,883	0,468	1,00	0,692	0,840
	C ₂ H ₂	0,915	0,899	0,605	0,692	1,00	0,972
	C ₂ H ₂ S	0,820	0,965	0,586	0,840	0,972	1,00
Повзучий розряд ρ _{крит} , 8, 0,95=0,602	H ₂	1,00	0,885	0,903	0,894	0,815	0,909
	CH ₄	0,885	1,00	0,887	0,969	0,839	0,975
	C ₂ H ₆	0,903	0,887	1,00	0,832	0,797	0,891
	C ₂ H ₄	0,894	0,969	0,832	1,00	0,855	0,976
	C ₂ H ₂	0,815	0,839	0,797	0,855	1,00	0,932
	C ₂ H ₂ S	0,909	0,975	0,891	0,976	0,932	1,00

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів парної кореляції в трансформаторах з дефектами термічного типу

Тип дефекту	Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂ S
Перегрів у діапазоні середніх температур (від 300 до 700°C) ρ _{крит.} , 14, 0,95=0,497	H ₂	1,00	-0,619	-0,582	-0,584	0,398	-0,602
	CH ₄	-0,619	1,00	0,9986	0,9990	-0,023	0,9998
	C ₂ H ₆	-0,582	0,9986	1,00	0,9997	0,0212	0,9994
	C ₂ H ₄	-0,584	0,9990	0,9997	1,00	0,021	0,9997
	C ₂ H ₂	0,398	-0,023	0,0212	0,021	1,00	-0,0019
	C ₂ H ₂ S	-0,602	0,9998	0,9994	0,9997	-0,0019	1,00
Високотемпературний перегрів (вище 700°C) ρ _{крит.} , 52, 0,95=0,273	H ₂	1,00	0,108	0,012	0,324	-0,179	0,240
	CH ₄	0,108	1,00	0,946	0,899	-0,078	0,954
	C ₂ H ₆	0,012	0,946	1,00	0,922	-0,069	0,960
	C ₂ H ₄	0,324	0,899	0,922	1,00	-0,136	0,989
	C ₂ H ₂	-0,179	-0,078	-0,069	-0,136	1,00	-0,111
	C ₂ H ₂ S	0,240	0,954	0,960	0,989	-0,111	1,00

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів парної кореляції в трансформаторах з комбінованими дефектами

Тип дефекту	Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂ S
Перегрів у діапазоні середніх температур (від 300 до 700°C), що супроводжується розрядами ρ _{крит.} , 10, 0,95=0,576	H ₂	1,00	0,557	0,899	0,795	0,341	0,740
	CH ₄	0,557	1,00	0,527	0,783	-0,106	0,945
	C ₂ H ₆	0,899	0,527	1,00	0,923	0,675	0,774
	C ₂ H ₄	0,795	0,783	0,923	1,00	0,515	0,941
	C ₂ H ₂	0,341	-0,106	0,675	0,515	1,00	0,200
	C ₂ H ₂ S	0,740	0,945	0,774	0,941	0,200	1,00
Високотемпературний перегрів (вище 700°C) і розряд ρ _{крит.} , 14, 0,95=0,497	H ₂	1,00	0,999	0,943	0,931	0,185	0,949
	CH ₄	0,999	1,00	0,939	0,925	0,165	0,944
	C ₂ H ₆	0,943	0,939	1,00	0,995	0,236	0,996
	C ₂ H ₄	0,931	0,925	0,995	1,00	0,261	0,998
	C ₂ H ₂	0,185	0,165	0,236	0,261	1,00	0,274
Високотемпературний перегрів (вище 700°C) перехідний у дуговий розряд ρ _{крит.} , 22, 0,95=0,423	H ₂	1,00	0,985	0,979	0,978	0,988	0,980
	CH ₄	0,985	1,00	0,999	0,998	0,988	0,9991
	C ₂ H ₆	0,979	0,999	1,00	0,9997	0,983	0,99991
	C ₂ H ₄	0,978	0,998	0,9997	1,00	0,982	0,99995
	C ₂ H ₂	0,988	0,988	0,983	0,982	1,00	0,984
C ₂ H ₂ S	0,980	0,9991	0,99991	0,99995	0,984	1,00	

Електричні дефекти. У даній роботі досліджувався кореляційний зв'язок між газами при часткових, дугових і повзучих розрядах. Проаналізуємо кореляцію між газами для кожного типу дефекту.

Часткові розряди. Часткові розряди супроводжуються виділенням водню (H₂), який є ключовим газом для даного типу дефекту й у значно меншій кількості метану (CH₄). Етан і етилен (C₂H₆ і C₂H₄) присутні в дуже незначній

кількості, на рівні аналітичного порога їх розпізнавання (0,0015 % об.). Концентрації ацетилену (C_2H_2) не перевищують аналітичного порога розпізнавання, а для слабких розрядів межі виявлення даного газу, хроматографом (приблизно, 0,00005 % об.).

Збільшення потужності часткових розрядів супроводжується збільшенням відносної концентрації C_2H_6 і C_2H_4 і утворенням C_2H_2 . Як видно з табл. 1, при розвитку часткових розрядів, значимий кореляційний зв'язок виявлений між H_2 , CH_4 і C_2H_6 . Найбільшу тісноту зв'язку із сумою газів вуглеводневого ряду має CH_4 , що свідчить про те, що серед усіх газів вуглеводневого ряду максимальну концентрацію має метан.

Дугові розряди. Стійкий дуговий розряд супроводжується виділенням великої кількості енергії за короткий проміжок часу. Характерними газами для дугового розряду є H_2 і C_2H_2 , крім того виділяються CH_4 і C_2H_4 з довільним змістом і незначний зміст C_2H_6 . Аналізуючи дані табл. 1 легко побачити, що при дугових розрядах водень має значимий кореляційний зв'язок з метаном і ацетиленом, метан з воднем, етиленом і ацетиленом, етан тільки з ацетиленом, а етилен з метаном і етиленом. Ацетилен має значиму кореляцію з усіма газами. При цьому саме ацетилен має найбільше значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду, що говорить про те, що серед газів вуглеводневого ряду, максимальна концентрація при дуговому розряді спостерігається саме в C_2H_2 . Залежності між газами, що мають значимий кореляційний зв'язок, при дуговому розряді в трансформаторах, наведено на рис. 1. З рисунка видно, що при тому самому характері дефекту, концентрації газів відрізняються на кілька порядків, але при цьому між концентраціями наведених газів, існує значима кореляційна залежність.

Повзучий розряд. Даний вид розряду характеризується значно більшим виділенням енергії, у порівнянні із частковими або іскровими розрядами.

При повзучому розряді характерними газами є H_2 , C_2H_4 , CH_4 і меншою мірою C_2H_2 . Як видно з табл. 1, при повзучому розряді всі гази мають значиму кореляцію між собою. Це можна пояснити, як більшими значеннями виділеної енергії при повзучому розряді, так і тим що, порядку 30 % значень газів у даній вибірці отримані для трансформаторів, ушкоджених повзучим розрядом. Найбільший інтерес при аналізі кореляційних зв'язків між газами при повзучому розряді представляють залежності між окремими газами й сумою газів вуглеводневого ряду. Найбільше значення коефіцієнта кореляції (найбільший внесок) мають C_2H_4 , C_2H_6 і C_2H_2 , що повністю збігається з характеристикою даного типу дефекту.

Аналізуючи дані табл. 1, слід зазначити, що в міру росту енергії, що виділяється при різних типах дефектів, загальна кількість газів, що мають значиму кореляцію зростає, це цілком зрозуміло, оскільки зі збільшенням енергії дефекту зростає ступінь деструкції ізоляції.

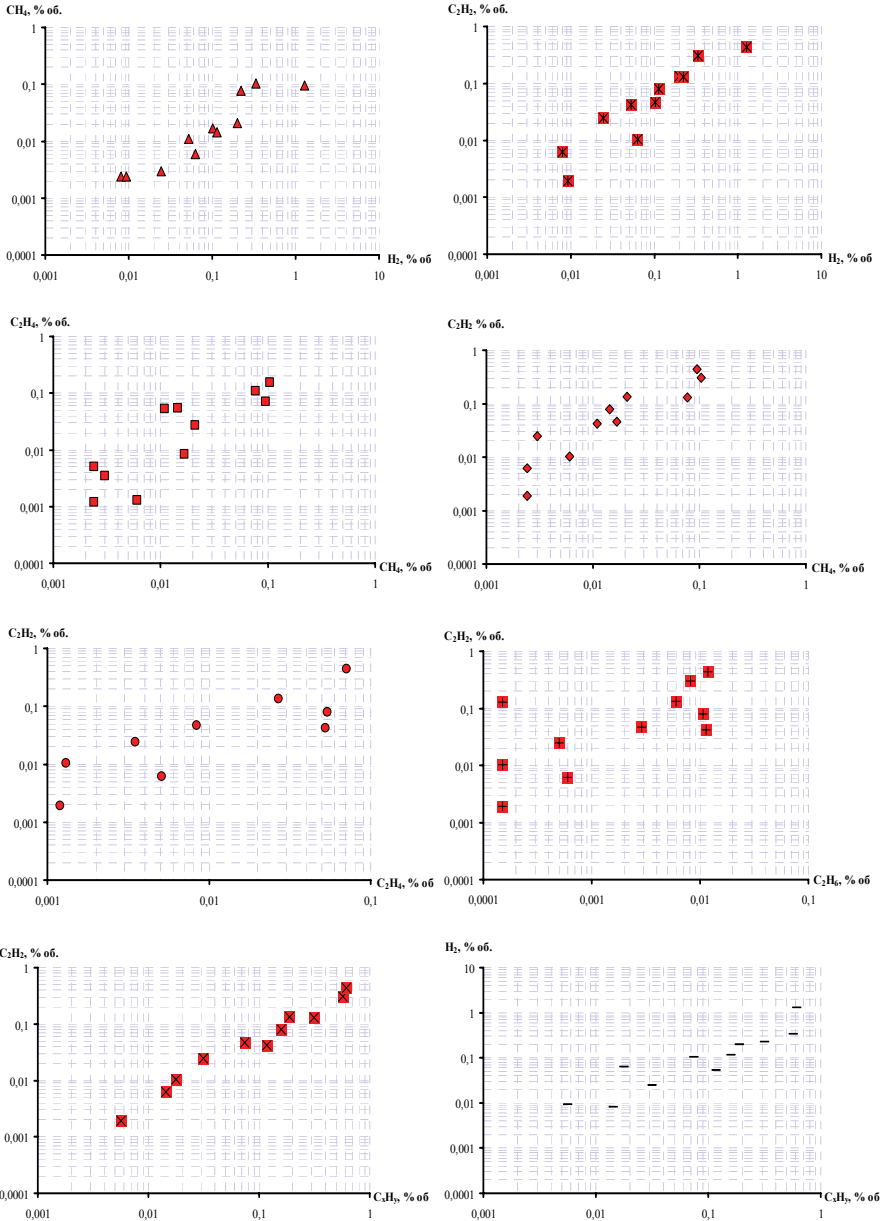


Рисунок 1 – Залежності між газами, що мають значимий кореляційний зв'язок, при дуговому розряді

Термічні дефекти. Аналізувалися значення коефіцієнтів парної кореляції для перегрівів у діапазоні середніх і високих температур. Значення коефіцієнтів парної кореляції між газами для даних дефектів наведено в табл. 2. Проаналізуємо кореляцію між газами для кожного типу дефекту.

Перегрів у діапазоні середніх температур (від 300 до 700°C). Розвиток даного дефекту супроводжується збільшенням концентрації C_2H_4 стосовно насичених вуглеводневих газів CH_4 і C_2H_6 і H_2 з ростом температури. При температурі 300-400°C концентрації C_2H_4 і C_2H_6 вирівнюються. При температурі 500°C і вище концентрація C_2H_4 перевищує концентрацію етану і C_2H_4 стає ключовим газом. Дані положення підтверджуються результатами кореляційного аналізу, які наведено в табл. 2. Як видно з таблиці значиму кореляцію між собою мають три гази: CH_4 і C_2H_6 і C_2H_4 . При цьому всі три гази мають приблизне однакове значення коефіцієнтів парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду.

Високотемпературний перегрів вище 700°C. З ростом температури швидкість утворення C_2H_4 зростає. При температурі вище 750°C, енергії, що виділилася досить для утвору незначних концентрацій C_2H_2 . Концентрація C_2H_6 відносно C_2H_4 помітно знижується. Примітно, що як і для попереднього випадку значиму кореляцію мають ті ж три гази CH_4 і C_2H_6 і C_2H_4 . Але основною відмінністю високотемпературного перегріву є те, що змінилася тіснота зв'язку між даними газами й сумою газів вуглеводневого ряду. При високотемпературному перегріві максимальне значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду, спостерігається етилену, потім етану й метану. Дану тенденцію наочно ілюструють залежності, наведені на рис. 2.

Комбіновані дефекти. Як показав аналіз вихідної вибірки, найбільше часто зустрічаються дефекти, у яких електричні дефекти супроводжуються перегрівами. До таких типів дефектів відносяться замикання магнітопроводу на бак, порушення контактних і струмоведучих з'єднань, обвуглювання ізоляції, дефекти РПН і ряд інших. На відміну від дефектів електричного й термічного характеру, склад і зв'язок між газами в маслі при комбінованих дефектах описаний, не так повно. У діючому в Україні СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 для розпізнавання таких типів дефектів пропонується використовувати графічні образи, які представляють із себе комбінації відповідних образів, для термічних і електричних дефектів. Значення коефіцієнтів парної кореляції для трьох типів комбінованих дефектів наведено в табл. 3.

Перегрів у діапазоні середніх температур (від 300 до 700°C), що супроводжується розрядами. Як видно з табл. 3 при даному типі дефекту спостерігається значима кореляція між воднем, метаном і етиленом. Метан має значимий зв'язок з етиленом, а етан з етиленом і ацетиленом. Етилен має значиму кореляцію з усіма газами крім ацетилену, а ацетилен тільки з метаном.

Найбільше значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду мають метан і етилен.

Високотемпературний перегрів (вище 700°C) і розряд. Для даного типу дефекту (див. табл. 3) характерна наявність значимого кореляційного зв'язку між усіма газами за винятком ацетилену. Ацетилен не має значимому зв'язку з жодним з газів. Найбільше значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду мають етилен, етан, водень і метан. Залежності між газами, що мають значимий кореляційний зв'язок, при даному типі дефекту наведено на рис. 3.

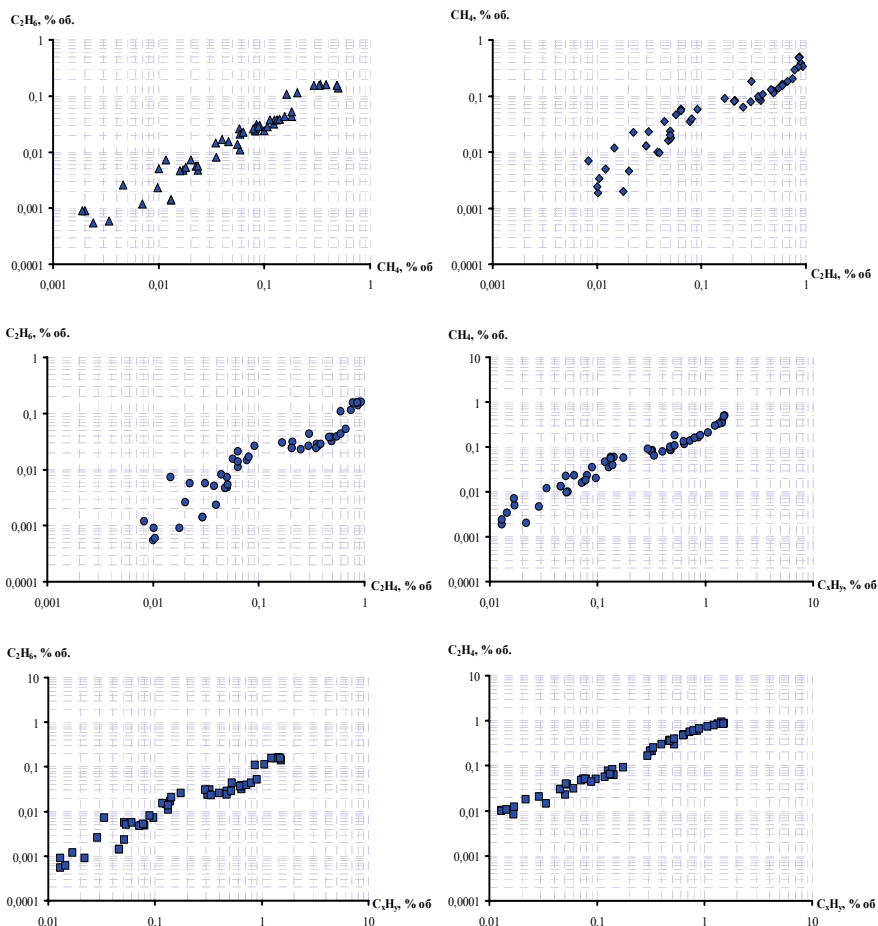


Рисунок 2 – Залежності між газами, що мають значимий кореляційний зв'язок, при високотемпературному перегріві вище 700°C

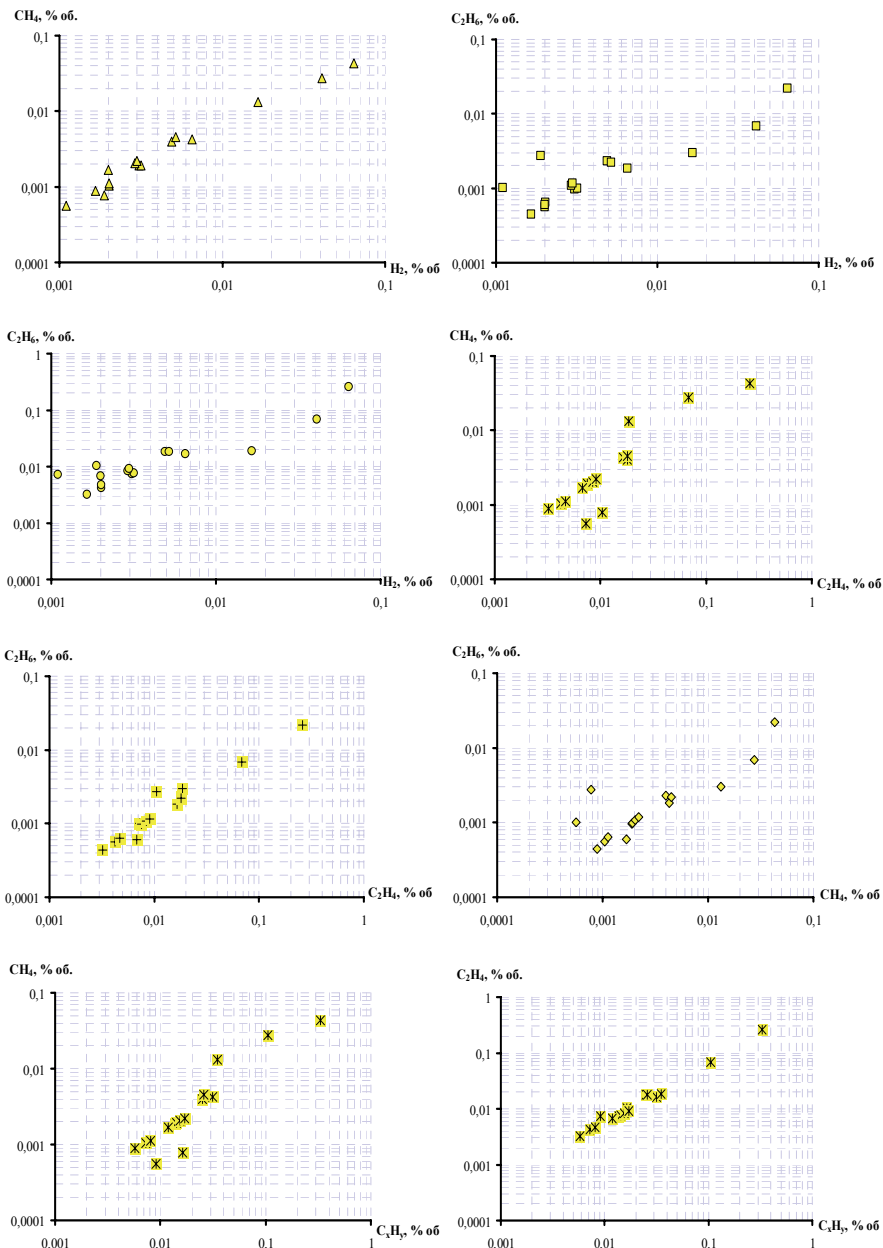


Рисунок 3 – Залежності між газами, що мають значимий кореляційний зв'язок, при високотемпературному перегріві вище 700°C, що супроводжується розрядами

Високотемпературний перегрів (вище 700°C) перехідний у дуговий розряд. Як видно з табл. 3 розвиток даного дефекту супроводжується наявністю значимої кореляції між усіма газами. При цьому найбільше значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду мають етилен, етан і метан.

Узагальнюючи результати, наведені в табл. 3, можна констатувати:

1) При розвитку комбінованих дефектів, значима кореляція спостерігається між газами, характерними для відповідних типів термічних і електричних дефектів;

2) У міру росту енергії, що виділяється при різних типах дефектів, загальна кількість газів, що мають значиму кореляцію між собою зростає.

Висновки:

1. Для всіх типів дефектів газу, характерні для даного процесу мають значимий кореляційний зв'язок: H_2 , CH_4 – для часткових розрядів; H_2 , C_2H_2 – для дугових розрядів; H_2 , C_2H_4 , CH_4 – для повзучих розрядів; CH_4 , C_2H_4 і C_2H_6 – для дефектів термічного характеру;

2. Крім значимої кореляції між газами, характерними для даного типу дефекту, виявлений значимий зв'язок і для газів супутніх розвитку даного типу дефекту. Наприклад, значимий зв'язок між CH_4 і C_2H_4 при дугових розрядах;

3. При розвитку комбінованих дефектів, значима кореляція спостерігається між газами, характерними для відповідних типів термічних і електричних дефектів. Наприклад CH_4 , C_2H_4 і C_2H_6 (характерні для термічних дефектів) і H_2 (характерний для електричних дефектів);

4. У міру зростання енергії, що виділяється при різних типах дефектів, загальна кількість газів, що мають значиму кореляцію між собою зростає;

5. Кількість газів, що мають значиму кореляцію між собою залежить не тільки від енергії, що виділяється при даному типі дефекту, але й від стадії розвитку дефекту й ступені деструкції ізоляції;

6. Найбільше значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду, має газ характерний для даного типу дефекту. Наприклад, CH_4 – перегрів у діапазоні середніх температур, C_2H_4 – високотемпературний перегрів, C_2H_2 – дуговий розряд.

Напрямок подальших досліджень. Отримані результати є підставою для розробки статистичних моделей дефектів. Дані моделі повинні адекватно враховувати як кількісну, так і якісну відмінність у вмісті газів в маслі при різних типах дефектів.

Список літератури: 1. Липштейн Р. А. Трансформаторное масло / Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с. 2. Джуварлы Ч. М. Электрический разряд в газовых включениях высоковольтной изоляции / Ч. М. Джуварлы, Г. В. Вечхайзер, П. В. Леонов. – Баку: ЭЛМ, 1983. – 192 с. 3. Зузак М. С. Обнаружение дефектов силовых трансформаторов по составу растворенных в масле газов / М. С. Зузак, В. Л. Таловерья, Э. Н. Мищенко // Электрические станции. – 1978. – № 6. – С. 75–76. 4. Райгородский И. М. Использование анализа газов для контроля состояния масляных трансформаторов // Энергохозяйство за рубежом. – 1975. – № 2. – С. 27-33. 5. Сенкевич Е. Д., Штерн Е. Н. Обнаружение частичных разрядов в образцах масляной изоляции с помощью хроматографического анализа // Электротехника. – 1974. – № 4. – С. 58-61. 6. Шутенко О. В. Комплексный корреляционный анализ показателей качества трансформаторного масла / О. В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2008. – № 45. – С. 156-167. 7. Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов Таблицы математической статистики. – М.: «Наука», 1965. – 464 с. 8. Шутенко О. В., Баклай Д. Н. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных : Учеб. пособие для вузов / О. В. Шутенко, Д. Н. Баклай – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – 268 с.

Bibliography (transliterated): 1. Lipshtejn R. A. Transformatornoe maslo. R. A. Lipshtejn, M. I. Shahnovich. Moscow: Jenergoatomizdat, 1983. 296 Print. 2. Dzhubarly Ch.M. Jelektricheskiy razrjad v gazovyh vkljuchenijah vysokovolt'noj izoljicii. Ch. M. Dzhubarly, G. V. Vechhajzer, P. V. Leonov. Baku: JeLM, 1983. 192 Print. 3. Zuzak M. S. Obnaruzhenie defektov silovyh transformatorov po sostavu rastvorenyh v masle gazov. M. S. Zuzak, V. L. Talover'ja, Je. N. Mishhenko. Jelektricheskie stancii. 1978. No 6. 75-76 Print. 4. Rajgorodskij I. M. Ispol'zovanie analiza gazov dlja kontrolja sostojanija masljanyh transformatorov. Jenergohozajstvo za rubezhom. 1975. No 2. 27-33 Print. 5. Senkevich E. D., Shtern E. N. Obnaruzhenie chastichnyh razrjadov v obrazcah masljanoj izoljicii s pomoshh'ju hromatograficheskogo analiza. Jelektrotehnika. 1974. No 4. 58-61 Print. 6. Shutenko O. V. Kompleksnyj korreljacionnyj analiz pokazatelej kachestva transformatornogo masla. O. V. Shutenko. Visnik NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «KhPI». 2008. No 45. 156-167 Print. 7. L. N. Bol'shev, N. V. Smirnov Tablicy matematicheskoj statistiki. Moscow: «Nauka», 1965. 464 Print. 8. Shutenko O. V., Baklaj D. N. Planirovanie jeksperimental'nyh issledovanij v jelektrojenergetike. Metody obrabotki jeksperimental'nyh dannyh. Ucheb. posobie dlja vtuzov. O. V. Shutenko, D. N. Baklaj. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 268 Print.

Поступила (received) 17.04.2015

РЕФЕРАТИ

УДК 621.3.022: 621.7.044.7

Нова резистивна схема захисту високовольтних конденсаторів в зарядно-розрядних ланцюгах потужних ємнісних накопичувачів енергії / М.І. Баранов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 3-10. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведені результати оцінки основних параметрів запропонованої резистивної схеми захисту високовольтних конденсаторів потужного ємнісного накопичувача енергії (ЕНЕ) багатомодульного виконання від аварійних надструмів. Показано, що така схема захисту ЕНЕ не тільки в десятки разів обмежує струм короткого замикання через його конденсатори в аварійному режимі роботи ЕНЕ, але і запобігає вибухоподібному руйнуванню його захисних графіто-керамічних резисторів типу ТВО-60.

Ключові слова: потужний ємнісний накопичувач енергії; високовольтний імпульсний конденсатор; високовольтний захисний резистор; аварійний надструм.

УДК 621.763+537.527

Високовольтна установка для синтезу нановуглецю з опіон-like структурою з системою керування електричними характеристиками газового розряду / Л. З. Богуславський, Д. В. Вінниченко, Н. С. Назарова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 11-23. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено аналіз умов, необхідних для електророзрядного синтезу нановуглецю. Обґрунтовано використання оптимальної системи керування електричними характеристиками газового розряду. Розроблено генератор високовольтних імпульсів, який дозволяє отримувати необхідний широкий діапазон електричних характеристик розрядних імпульсів. Розроблено базове технологічне рішення для реалізації електророзрядного високочастотного способу синтезу аморфного нановуглецю з опіон-like структурою і виготовлено експериментальну високовольтну установку.

Ключові слова: високочастотний електророзрядний синтез, аморфний нановуглець з опіон-like структурою, система оптимального керування, електричні характеристики газового розряду, високовольтна технологічна установка.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Алгоритм адаптивного керування імпульсним високовольтним джерелом живлення системи електрофільтрації різноімпедансних газових викидів / Л. З. Богуславський, Л. М. Мирошніченко, Л. С. Овчиннікова, С. С. Козирєв // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 23-30. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Розроблено алгоритм адаптивного керування імпульсним джерелом живлення системи електрофільтрації, який забезпечує коригування параметрів імпульсів відповідно до поточного складу екологічно небезпечних промислових газових викидів. Визначено інформаційні координати та канали керуючих впливів. Даний алгоритм дає змогу генерувати високовольтні імпульси з параметрами, які забезпечують ефективну деструкцію усіх вагомих складових різноімпедансних газових викидів в процесі обробки.

Ключові слова: адаптивне керування, алгоритм, імпульсні джерела живлення, електрофільтрація, різноімпедансні газові викиди.

УДК 681.84.087.47:621.391

Особливості методу ущільнення багатоканального звукового контенту / А. О. Довженко, В. Б. Швайченко, О. Шарадга // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 30-36. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-

0740.

Визначено особливості методів передискретизації в цифровій обробці багатоканальних форматів для покращення електромагнітної сумісності (ЕМС) цифрових звукотехнічних систем. Досліджено ефективність каналного мультиплексування під час передискретизації за умови застосування дельта-сігма модуляції. Проведено порівняння особливостей сучасних аудіоформатів за критеріями ЕМС. Оцінено перспективи та визначені переваги пропонованого методу ущільнення спектральних складників прямого цифрового потоку.

Ключові слова: багатоканальні аудіоформати, електромагнітна сумісність, обробка сигналів, спектральні характеристики, цифрові звукотехнічні системи

УДК 621.319.53

Генератор електрофізичної установки на основі високовольтного імпульсного трансформатора / В.М. Іванов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 36-43. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0740.

Створені й успішно пройшли апробацію в заводських умовах генератори високої напруги, що містять імпульсні трансформатори з напівпровідниковими IGBT ключами в низьковольтному ланцюзі трансформатора, зразка електрофізичної установки для конверсії метану в складі коксового газу в синтез-газ за допомогою високовольтних імпульсних об'ємних розрядів: коронного і бар'єрного. Режим роботи ключа, що розмикає, дозволяє уникнути обмеження по амплітуді імпульсів напруги на навантаженні і повністю передати накопичену енергію в індуктивному накопичувачі.

Ключові слова: електрофізичну установка, високовольтний імпульсний трансформатор, напівпровідниковий ключ, імпульсний коронний розряд, імпульсний бар'єрний розряд.

УДК 519.2

Аналіз конструкцій дослідних зразків пристроїв блокування оперативних перемикачів. / Г.М. Коліушко, О.С. Недзельський, О.Г. Понуждасва, Р.К. Борісов, Д.І. Ковальов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 43-49. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті подані описи конструкцій чотирьох розроблених дослідних зразків пристроїв блокування оперативних перемикачів (ПБОП) комутуючих апаратів високої напруги, що використовуються на енергооб'єктах, розглянуті переваги та недоліки дослідних зразків. У результаті усунення недоліків розроблено та виготовлено оптимальний варіант конструкції пристрою, з яким можна ознайомитися у цій статті. Усі переваги попередніх розроблених зразків збережені.

Ключові слова: пристрій блокування оперативних перемикачів, електромагнітний механізм, оперативні блокування безпеки.

УДК 621.391.825

Енергетичний механізм взаємодії імпульсних електромагнітних випромінювань з радіоелектронними системи в режимі зворотних відмов / А.І. Коробко, З.І. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 49-55. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто модель енергетичної взаємодії надширокосмугових імпульсних електромагнітних випромінювань природного і штучного походження з радіоелектронними системами в режимі оборотних відмов. Проведено аналіз двох основних шляхів утворення хибних сигналів на виходах радіоелектронних систем, які характеризують режим оборотних відмов: взаємодія імпульсного електромагнітного випромінювання з провідниками друкованих плат і безпосередню взаємодію випромінювання з активними напівпровідниковими елементами, які є складовими частинами радіоелектронних систем. Представлена розрахункова топологічна схема для аналізу електромагнітних процесів в розгалужених радіоелектронних системах. Проведено аналіз практичної застосовності і реалізованості чисельних рішень для розрахункової топологічної схеми. Розглянуто механізм взаємодії імпульсного електромагнітного поля з основними елементами радіоелектронних систем на основі енергетичних характеристик цієї взаємодії. Наведено результати

тати аналізу енергетичного механізму взаємодії.

Ключові слова: імпульсна електромагнітне поле, радіоелектронна система, оборотний відмову, друкована плата.

УДК 621.318

Вплив стороннього електромагнітного випромінювання на спектр поверхневих коливань напівпровідникових структур / В.І. Кравченко, А.А.Серков, В.С. Бреславець, І. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 56-62. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Запропонований механізм появи поверхневих електронних станів на нерівних межах основних твердих середовищ. Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики перехідного та черенковського випромінювання. Побудовано теорію беззіткнувального згасання поверхневих полярітонів у квантовому та класичному наближеннях.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, беззіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.318

Вплив стороннього електромагнітного випромінювання на механізми взаємодії поверхневих коливань з електронами провідності напівпровідникових структур / В.І. Кравченко, А.А.Серков, В.С. Бреславець, І. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 63-69. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Побудовано теорію беззіткнувального згасання поверхневих полярітонів у квантовому та класичному наближеннях. Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Запропонований механізм появи поверхневих електронних станів на нерівних межах провідних твердих середовищ. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики перехідного та черенковського випромінювання.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, беззіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.318

Хвилеводні характеристики напівпровідникових комплектуючих електрорадіовиробів за наявності потоку заряджених часток / В.І. Кравченко, А.А.Серков, В.С. Бреславець, І. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 69-75. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Запропонований механізм появи поверхневих електронних станів на нерівних межах провідних твердих середовищ. Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики

ки перехідного та черенковського випромінювання. Побудовано теорію беззіткнувального згасання поверхневих полярітонів у квантовому та класичному наближеннях.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, беззіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.318

Хвилеводні характеристики напівпровідникової надгратки в умовах впливу електромагнітного випромінювання / В.І. Кравченко, А.А.Серков, В.С. Бреславець, І. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 76-81. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Запропонований механізм появи поверхневих електронних станів на нерівних межах провідних твердих середовищ. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики перехідного та черенковського випромінювання. Побудовано теорію беззіткнувального згасання поверхневих полярітонів у квантовому та класичному наближеннях.

Ключові слова: електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, беззіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості, генерування, черенковське та перехідне випромінювання, гелікони, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

УДК 621.763+537.527

Ієрархічна система моніторингу поточного стану високовольтних генераторів імпульсних струмів / Н. С. Назарова, Д. В. Вінниченко, І. Л. Вінниченко, Ю. О. Адамчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 82-92. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено аналіз задач контролю процесів в розрядному контурі генератора імпульсних струмів для розрядноімпульсних технологій. Обґрунтовано створення системи моніторингу поточного стану генератора на принципах модульності, ієрархічності, використання колективних ресурсів і потужної обчислювальної системи реального часу. Розроблено схему реалізації системи моніторингу на базі розробленого промислового контролеру і проведено її випробування на експериментальній установці для розрядноімпульсної технології виготовлення буронабивних свай.

Ключові слова: ієрархічна система моніторингу, генератор імпульсних струмів, розрядно-імпульсна технологія.

УДК 621.317.3

Генератор для випробувань БАО на сприйнятливість до перехідних процесів, викликаних блискавкою «ГЛІА-МКУ-4» («багаторазові удари» форма 4) / Ю.С.Немченко, В.В.Князев, І.П.Лесной, С.Б.Сомхів // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 92-98. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Описано конструкцію та результати атестації генератора, призначеного для випробувань бортового авіаційного обладнання на сприйнятливість до перехідних процесів, викликаних блискавкою «багаторазові удари», відповідно до вимог міжнародних стандартів. Генератор виробляє циклограми імпульсів напруги форми 4 по 5-х рівнях іспитів, випробування проводяться методом «уведення в уземлення».

Ключові слова: випробування, бортове авіаційне обладнання, несприйнятливість, блискавка, перехідні процеси, генератор, атестація.

УДК 519.2

Індукційний перетворювач імпульсного магнітного поля молнії / Ю.С. Немченко, С.П. Шаламов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 99-108. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті розглянуті стислі теоретичні відомості для вибору параметрів надширокопasmого вимірювача напруженості магнітного поля індукційного типу. Представлені результати реалізації перетворювача для вимірювання біекспоненціальною імпульсу магнітного поля. Наведено параметри створеного перетворювача. Використовуючи програму MicroCap, змодельована робота перетворювача при впливі на схему сигналу, параметри якого еквівалентні згенерованому в системі кільцю Гельмгольца. Проведена калібрування перетворювача.

Ключові слова: імпульсне магнітне поле, електромагнітна індукція, біекспоненціальний імпульс, калібрування індукційного перетворювача, кільця Гельмгольца.

УДК 621.313

Система двох ЄНЕ для формування випробувальних імпульсів струму з монотонним наростанням і спадом значень / О. О. Пстков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 109-115. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

У роботі отримані моделі амплітудно-часових параметрів імпульсу струму в навантаженні, виведене співвідношення, яке зв'язує значення параметрів елементів розрядного кола при фіксованому значенні відношення часових параметрів імпульсу струму й запропонована методика визначення параметрів елементів випробувальної схеми із двома смісними накопичувачами енергії. Матеріали статті можуть бути використані для подальших досліджень випробувальних пристроїв з кількома смісними накопичувачами енергії.

Ключові слова: смісний накопичувач енергії, імпульс струму, амплітудно-часові параметри.

УДК 621.314: 621.391

Методи моделювання для оцінки електромагнітної сумісності звукотехнічних систем з імпульсними джерелами живлення та підсилювачами класу D / В.В. Пілінський, Д.М. Пробитий, О.О. Довженко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 115-122. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведено аналіз відомих методів моделювання завад від блоків звукотехнічних систем з ключовими елементами. Запропоновано підхід до створення моделі в середовищі відкритого програмного забезпечення LTSpice, з урахуванням особливостей узлів ключового типу та еквівалента мережі для прогнозування кондуктивних завад. Проведено оцінку характеристик кондуктивних завад при зміні навантаження на виході джерела вторинного електроживлення ключового типу в режимі Burst Mode. Розроблена модель дозволяє оцінювати параметри електромагнітної обстановки на етапі проектування за різних значень частоти звукового сигналу, навантаження, видів модуляції підсилювача класу D та режимів роботи джерела вторинного електроживлення ключового типу.

Ключові слова: електромагнітне середовище, схемотехнічне моделювання, підсилювач класу D, джерело живлення ключового типу, електромагнітна сумісність, поєднаний вплив.

УДК 621.317.7.023

Апаратно-програмний комплекс для вимірювання напруженості електричного поля / І.О. Постільник, В.В. Князєв // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 123-128. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

У цій статті пропонується опис апаратно-програмного комплексу розробленого з метою вимірювання екрануючих властивостей корпусів електрообладнання, а також можливість використання його в якості зворотного зв'язку в системі автоматичного регулювання підсилення (АПП). Наводиться реалізація апаратно-програмного комплексу. Описуються конструктивні

рішення апаратної частини. Розглянуто проблему використання коаксіальних ліній зв'язку у вимірюванні екрануючих властивостей. Особливу увагу в статті звернено на використання в апаратно-програмному комплексі оптичної лінії зв'язку для обміну даними. Описана функціональна частина інтерфейсу програмної частини.

Ключові слова: вимірювач напруженості електричного поля, волоконно-оптична лінія, апаратно-програмний комплекс, логарифмічний детектор, ЕМС, екрануючі властивості.

УДК 621.317.39.084.2

Резонансні спектри неоднорідних коаксіальних резонаторів для визначення діелектричної проникності рідких середовищ в СВЧ діапазоні / В.В. Рудаков, О.А. Коробко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 129-137. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

В роботі проведено аналіз частотних спектрів класичного однорідного коаксіального резонатора з електричною довжиною, що дорівнює $1/4$ довжини хвилі і неоднорідного коаксіального резонатора на лініях з різними хвильовими опорами. Частотний спектр класичного резонатора характеризуються малим розносом частот першого і другого резонансів, що дозволяє використовувати його виключно в схемах з дослідженням амплітудно-частотних характеристик для визначення діелектричної постійної заповнює його середовища. Запропоновано новий тип неоднорідного резонатора коаксіального типу на лініях з різними хвильовими опорами. Частотний спектр неоднорідного резонатора характеризується різким (до 4 разів) зменшенням першої резонансної частоти і істотним (до 5 разів) збільшенням розносу першої та другої резонансних частот. Неоднорідний резонатор має в 4 рази меншу геометричну довжину і може використовуватися в режимі вільних коливань вимірювального генератора. Неоднорідний резонатор дозволяє здійснювати вимірювання діелектричної постійної середовища в розширеному частотному діапазоні від десятків мегагерц до 1,8 ГГц.

Ключові слова: резонансні спектри, неоднорідний коаксіальний резонатор, діелектрична проникність, рідке середовище.

УДК 621.762.3: 537.528

Вплив складу робочого середовища на амплітуду хвилі тиску високовольтного електричного розряду / А.С. Торпаков, О.Н. Сизоненко, Е.М. Шерегій, С.В. Прохоренко, Э.И. Тафтай // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 138-148. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Наведені результати експериментальних досліджень амплітуди хвилі тиску за допомогою хвильового п'єзоелектричного датчика при високовольтному електричному розряді у воді, у воді з додаванням порошку Ті, у гасі та у гасі з додаванням порошку Ті. Виконано порівняння експериментальних значень амплітуди з розрахунковими. Експериментально встановлено вплив тип у дисперсійного середовища, концентрації дисперсної фази та параметрів розрядного контуру на амплітуду тиску.

Ключові слова: електричний розряд, порошок титану, концентрація, амплітуда тиску, дисперсна система.

УДК 621.317.3

Особливості стримерної корони зі стрижневих блискавкоприймачів / О.Ю. Чернухін, В.В.Князев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 149-155. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

У статті представлено результати експериментальних досліджень стримерної корони із стрижневих блискавкоприймачів у передгрозовий період. На підставі статистичної обробки результатів встановлено емпіричну залежність кількості поодиноких стримерів в коронному розряді від напруженості електричного поля, в якому знаходиться блискавкоприймач. Доведена істотна відмінність в характері залежності для стрижня квадратного перерізу з пласкою вершиною і

стрижня кругового перерізу із загостреною вершиною.

Ключові слова: передгрозові умови, стримерна корона, число одиничних стримерів, напруженість електричного поля, стрижневий блискавкоприймач.

УДК 621.317.78

Актуальність урахування впливу показників якості напруги при обліку електричної енергії / С. Ю. Шевченко, В. В. Волохін, І. М. Дяговченко, Д. М. Макуха // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 156-165. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто і проаналізовано вплив на роботу приладів обліку електричної енергії показників якості напруги, зокрема відхилення напруги від нормованих значень, колювання напруги, несинусоїдальність напруги, несиметрія напруги, провали напруги, імпульси напруги та тимчасові перенапруги. Визначено основні причини виникнення таких відхилень якості електроенергії, зроблено висновки щодо їх впливу на прилади обліку електричної енергії, розглянуто основні методи їх врахування.

Ключові слова: прилад обліку, лічильник електроенергії, електрична енергія, напруга, несиметрія, відхилення, вплив, похибка.

УДК 621.314

Аналіз кореляційних зв'язків між газами, розчиненими в маслі силових трансформаторів, при різних типах дефектів / О. В. Шутенко, Д. М. Баклай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 166-176. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Досліджена тіснота кореляційного зв'язку між газами, розчиненими в маслі силових трансформаторів при різних типах дефектів. Установлено наявність значимого зв'язку як між газами характерними для даного типу дефекту, так і між супутніми газами. Показано, що кількість газів, що мають значиму кореляцію між собою, зростає не тільки з ростом енергії, що виділяється при даному типі дефекту, але й від часу розвитку дефекту. Отримані результати є підставою для розробки статистичних моделей дефектів, які повинні адекватно враховувати як кількісну, так і якісну відмінність у вмісті газів в маслі при різних типах дефектів.

Ключові слова: хроматографічний аналіз розчинених у маслі газів, тип дефекту, кореляція між газами, електричний розряд, термічний перегрів, комбінований дефект.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.3.022: 621.7.044.7

Новая резистивная схема защиты высоковольтных конденсаторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 3-10. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты оценки основных параметров предложенной резистивной схемы защиты высоковольтных конденсаторов мощного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) многомодульного исполнения от аварийных сверхтоков. Показано, что такая схема защиты ЕНЭ не только в десятки раз ограничивает ток короткого замыкания через его конденсаторы в аварийном режиме работы ЕНЭ, но и предотвращает взрывообразное разрушение его защитных графито-керамических резисторов типа ТВО-60.

Ключевые слова: мощный емкостный накопитель энергии; высоковольтный импульсный конденсатор; высоковольтный защитный резистор; аварийный сверхток.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Высоковольтная установка для синтеза нанюглерода с onion-like структурой с системой управления электрическими характеристиками газового разряда / Л. З. Богуславский, Д. В. Винниченко, Н. С. Назарова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 11-23. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведен анализ условий, необходимых для электроразрядного синтеза нанюглерода. Обосновано применение оптимальной системы управления электрическими характеристиками газового разряда. Разработан генератор высоковольтных импульсов, который позволяет получать необходимый широкий диапазон электрических характеристик разрядных импульсов. Разработано базовое технологическое решение для реализации электроразрядного высокочастотного способа синтеза аморфного нанюглерода с onion-like структурой и изготовлено экспериментальную высоковольтную установку.

Ключевые слова: высокочастотный электроразрядный синтез, аморфный нанюглерод с onion-like структурой, система оптимального управления, электрические характеристики газового разряда, высоковольтная технологическая установка.

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Алгоритм адаптивного управления импульсным высоковольтным источником питания системы электрофильтрации разноимпедансных газовых выбросов / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, Л. Е. Овчинникова, С. С. Козырев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 23-30. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Разработан алгоритм адаптивного управления импульсным источником питания системы электрофильтрации, обеспечивающий корректировку параметров импульсов в соответствии с текущим составом экологически опасных промышленных газовых выбросов. Определены информационные координаты и каналы управляющих воздействий. Данный алгоритм дает возможность генерировать высоковольтные импульсы с параметрами, позволяющими вести эффективную деструкцию всех весомых составляющих в процессе обработки.

Ключевые слова: адаптивное управление, алгоритм, импульсные источники питания, электрофильтрация, экологически опасные промышленные выбросы.

УДК 681.84.087.47:621.391

Особенности метода уплотнения многоканального звукового контента / А. А. Довженко, В. Б. Швайченко, О. Шарадга // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика

високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 30-36. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

Определены особенности методов передискретизации в цифровой обработке многоканальных форматов для улучшения электромагнитной совместимости (ЭМС) цифровых звукотехнических систем. Исследована эффективность канального мультиплексирования в процессе передискретизации в режиме дельта-сигма модуляции. Проведено сравнение особенностей современных аудиоформатов в аспекте ЭМС. Оценены перспективы и определены достоинства предложенного метода уплотнения спектральных составляющих прямого цифрового потока.

Ключевые слова: многоканальные аудиоформаты, электромагнитная совместимость, обработка сигналов, спектральные характеристики, цифровые звукотехнические системы.

УДК 621.319.53

Генератор электрофизической установки на основе высоковольтного импульсного трансформатора / В.М. Иванов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 36-43. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-0740.

Созданы и успешно прошли апробацию в заводских условиях генераторы высокого напряжения, содержащие импульсные трансформаторы с полупроводниковыми *IGBT* ключами в низковольтной цепи трансформатора, образца электрофизической установки для конверсии метана в составе коксового газа в синтез-газ при помощи высоковольтных импульсных объемных разрядов: коронного и барьерного. Размыкающий режим работы ключа позволяет избежать ограничения по амплитуде импульсов напряжения на нагрузке и полностью передать запасенную энергию в индуктивном накопителе.

Ключевые слова: электрофизическая установка, высоковольтный импульсный трансформатор, полупроводниковый ключ, импульсный коронный разряд, импульсный барьерный разряд.

УДК 519.2

Анализ конструкций опытных образцов устройств блокирования оперативных переключений / Г.М. Колиушко, О.С. Недзельский, Е.Г. Понуждава, Р.К. Борисов, Д.И. Ковалев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 43-49. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье описаны конструкции четырех разработанных опытных образцов устройства блокировки оперативных переключений (УБОП) коммутирующих аппаратов высокого напряжения, используемых на энергообъектах, представлены преимущества и недостатки опытных образцов. В результате устранения недостатков разработан и изготовлен оптимальный вариант конструкции устройства, с которым можно ознакомиться в данной статье. Все преимущества предыдущих разработанных образцов сохранены.

Ключевые слова: устройство блокировки оперативных переключений, электромагнитный механизм, оперативные блокировки безопасности.

УДК 621.391.825

Энергетический механизм взаимодействия импульсных электромагнитных излучений с радиоэлектронными системами в режиме обратимых отказов / А.И. Коробко, З.И. Коробко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 49-55. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрена модель энергетического взаимодействия сверхширокополосных импульсных электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения с радиоэлектронными системами в режиме обратимых отказов. Проведен анализ двух основных путей образования ложных сигналов на выходах радиоэлектронных систем, которые характеризуют режим обратимых отказов: взаимодействие импульсного электромагнитного излучения с проводниками печатных плат и непосредственное взаимодействие излучения с активными полупроводниковыми элементами, которые являются составными частями радиоэлектронных систем. Представлена расчетная топологическая схема для анализа электромагнитных процессов в разветвленных радиоэлектронных системах. Проведен анализ практической применимости и реализуемости

численных решений для расчетной топологической схемы. Рассмотрен механизм взаимодействия импульсного электромагнитного поля с основными элементами радиоэлектронных систем на основе энергетических характеристик этого взаимодействия. Приведены результаты анализа энергетического механизма взаимодействия.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное поле, радиоэлектронная система, обратимый отказ, печатная плата.

УДК 621.318

Влияние стороннего электромагнитного излучения на спектр поверхностных колебаний полупроводниковых структур / В.И. Кравченко, А.А.Серков, В.С. Бреславец, И. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 56-62. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного поля. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетка, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.318

Воздействие стороннего электромагнитного излучения на механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур / В.И. Кравченко, А.А.Серков, В.С. Бреславец, И. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 63-69. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях. Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетка, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.318

Волноводные характеристики полупроводниковых комплекующих электрорадиоизделий при наличии потока заряженных частиц / В.И. Кравченко, А.А.Серков, В.С. Бреславец, И. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 69-75. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Определены механизмы возникновения неустойчиво-

стей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток., обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетка, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.318

Волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки в условиях влияния электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, А.А.Серков, В.С. Бреславец, И. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 76-81. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток., обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

Ключевые слова: электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетка, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

УДК 621.763+537.527

Иерархическая система мониторинга текущего состояния высоковольтных генераторов импульсных токов / Н. С. Назарова, Д. В. Винниченко, І. Л. Винниченко, Ю. О. Адамчук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 82-92. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведен анализ задач контроля процессов в разрядном контуре генератора импульсных токов для разрядноимпульсных технологий. Обосновано создание системы мониторинга текущего состояния генератора на принципах модульности, иерархичности, использования разделяемых ресурсов и мощной вычислительной системы реального времени. Разработана схемная реализация системы мониторинга на базе разработанного промышленного контролера и проведены ее испытания на экспериментальной установке для разрядноимпульсной технологии изготовления буронабивных свай.

Ключевые слова: иерархическая система мониторинга, генератор импульсных токов, разрядноимпульсные технологии.

УДК 621.317.3

Генератор для испытаний БАО на восприимчивость к переходным процессам, вызванных молнией «ИГЛА-МКУ-4» («многократные удары» форма 4) / Ю.С.Немченко, В.В.Князев, И.П.Лесной, С.Б.Сомхив // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 92-98. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-0740.

Описана конструкция и результаты аттестации генератора, предназначенного для испыта-

ний бортового авиационного оборудования на восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией «многократные удары», в соответствии с требованиями международных стандартов. Генератор производит циклограммы импульсов напряжения формы 4 по 5-ти уровням испытаний, испытания проводятся методом «кабельной инъекции».

Ключевые слова: испытание, бортовое оборудование, невосприимчивость, молния, переходные процессы, генератор, аттестация.

УДК 519.2

Индукционный преобразователь импульсного магнитного поля молнии / Ю.С. Немченко, С.П. Шаламов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 99-108. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье рассмотрены краткие теоретические сведения для выбора параметров сверхширокополосного измерителя напряженности магнитного поля индукционного типа. Представлены результаты реализации преобразователя для измерения биэкспоненциального импульса магнитного поля. Приведены параметры созданного преобразователя. Используя программу MicroCap, смоделирована работа преобразователя при воздействии на схему сигнала, параметры которого эквивалентны сгенерированному в системе колец Гельмгольца. Проведена калибровка преобразователя.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, электромагнитная индукция, биэкспоненциальный импульс, калибровка индукционного преобразователя, кольца Гельмгольца.

УДК 621.313

Система двух ЕНЭ для формирования испытательных импульсов тока с монотонным нарастанием и спадом значений / А. А. Петков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 109-115. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

В работе получены модели амплитудно-временных параметров импульса тока в нагрузке, выведено соотношение, связывающее значения параметров элементов разрядной цепи при фиксированном значении отношения временных параметров импульса тока и предложена методика определения параметров элементов испытательной схемы с двумя емкостными накопителями энергии. Материалы статьи могут быть использованы для дальнейших исследований испытательных устройств с несколькими емкостными накопителями энергии.

Ключевые слова: емкостной накопитель энергии, импульс тока, амплитудно-временные параметры.

УДК 621.314: 621.391

Методы моделирования для оценки электромагнитной совместимости звукотехнических систем с импульсными источниками питания и усилителями класса D / В.В. Пилинский, Д.М. Пробитый, А.А. Довженко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 115-122. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Проведен анализ известных методов моделирования помех от блоков звукотехнических систем с ключевыми элементами. Предложен подход к созданию модели в среде открытого программного обеспечения LTSpice с учетом особенностей узлов ключевого типа и эквивалента сети для прогнозирования кондуктивных помех. Проведена оценка характеристик кондуктивных помех при изменении нагрузки на выходе источника вторичного электропитания ключевого типа в режиме Burst Mode. Разработанная модель позволяет оценивать параметры электромагнитной обстановки на этапе проектирования при различных значениях частоты звукового сигнала, нагрузок, видов модуляции усилителя класса D и режимов работы источника вторичного электропитания ключевого типа.

Ключевые слова: электромагнитная обстановка схмотехническое моделирование, усилитель класса D, источник питания ключевого типа, электромагнитная совместимость, сочетанное воздействие.

УДК 621.317.7.023

Аппаратно-программный комплекс для измерения напряженности электрического поля / И.О. Постельник, В.В. Князев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 123-128. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

В этой статье предлагается описание аппаратно-программного комплекса разработанного с целью измерения экранирующих свойств корпусов электрооборудования, а также возможностью использования его в качестве обратной связи в системе автоматической регулировки усиления (АРУ). Приводится пошаговая реализации аппаратно-программного комплекса. Описываются конструктивные решения аппаратной части. Рассмотрена проблема использования коаксиальных линий связи в измерениях экранирующих свойств. Особое внимание в статье уделяется использованию в аппаратно-программном комплексе оптической линии связи для обмена данными. Описана функциональная часть интерфейса программной части.

Ключевые слова: измеритель напряженности электрического поля, волоконно-оптическая линия, аппаратно-программный комплекс, логарифмический детектор, ЭМС, экранирующие свойства.

УДК 621.317.39.084.2

Резонансные спектры неоднородных коаксиальных резонаторов для определения диэлектрической проницаемости жидких сред в СВЧ диапазоне / В.В. Рудаков, А.А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 129-137. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.

В работе проведен анализ частотных спектров классического однородного коаксиального резонатора с электрической длиной, равной $1/4$ длины волны и неоднородного коаксиального резонатора на линиях с различными волновыми сопротивлениями. Частотный спектр классического резонатора характеризуются малым разномом частот первого и второго резонансов, что позволяет использовать его исключительно в схемах с исследованием амплитудно-частотных характеристик для определения диэлектрической постоянной заполняющей его среды. Предложен новый тип неоднородного резонатора коаксиального типа на линиях с различными волновыми сопротивлениями. Частотный спектр неоднородного резонатора характеризуется резким (до 4 раз) уменьшением первой резонансной частоты и существенным (до 5 раз) увеличением разнуса первой и второй резонансных частот. Неоднородный резонатор имеет в 4 раза меньшую геометрическую длину и может использоваться в режиме свободных колебаний измерительного генератора. Неоднородный резонатор позволяет осуществлять измерения диэлектрической постоянной среды в расширенном частотном диапазоне от десятков мегагерц до 1,8 ГГц.

Ключевые слова: резонансные спектры, неоднородный коаксиальный резонатор, диэлектрическая проницаемость, жидкая среда.

УДК 621.762.3: 537.528

Влияние состава рабочей среды на амплитуду волны давления высоковольтного электрического разряда / А.С. Торпаков, О.Н. Сизоненко, Е.М. Шерегий, С.В. Прохоренко, Э.И. Гафтай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 138-148. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Приведены результаты экспериментальных исследований амплитуды волны давления с помощью волноводного пьезоэлектрического датчика при высоковольтном электрическом разряде в воде, воде с добавлением порошка Ti , керосине и керосине с добавлением порошка Ti . Выполнено сравнение экспериментальных значений амплитуды давления с расчетными. Экспериментально установлено влияние типа дисперсионной среды, концентрации дисперсионной фазы и параметров разрядного контура на амплитуду давления.

Ключевые слова: электрический разряд, порошок титана, концентрация, амплитуда давления, дисперсная система.

УДК 621.317.3

Особенности стримерной короны со стержневых молниеприемников/ А.Ю. Чернухин, В.В.Князев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 149-155. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований стримерной короны со стержневых молниеприемников, в предгрозовой период. На основании статистической обработки результатов установлена эмпирическая зависимость количества одиночных стримеров в коронном разряде от напряженности электрического поля, в котором находится молниеприемник. Доказано существенное отличие в характере зависимости для стержня квадратного сечения с плоской вершиной и стержня кругового сечения с заостренной вершиной.

Ключевые слова: предгрозовые условия, стримерная корона, число единичных стримеров, напряженность электрического поля, стержневой молниеприемник.

УДК 621.317.78

Актуальность анализа влияния показателей качества напряжения при учете электрической энергии / С. Ю. Шевченко, В. В. Волохин, И. Н. Дяговченко, Д. Н. Макуха // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 156-165. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрено и проанализировано влияние на работу приборов учета электрической энергии показателей качества напряжения, в частности отклонения напряжения от нормированных значений, колебания напряжения, несинусоидальность напряжения, несимметрия напряжения, провалы напряжения, импульсы напряжения и временные перенапряжения. Определены основные причины возникновения таких отклонений качества электроэнергии, сделаны выводы об их влиянии на приборы учета электроэнергии, рассмотрены основные методы их анализа.

Ключевые слова: прибор учета, счетчик электроэнергии, электрическая энергия, напряжение, несимметрия, отклонение, влияние, погрешность.

УДК 519.2

Анализ корреляционных связей между газами, растворенными в масле силовых трансформаторов, при различных типах развивающихся дефектов / О. В. Шутенко, Д. Н. Баклай // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – № 20 (1129). – С. 166-176. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Исследована теснота корреляционной связи между газами, растворенными в масле силовых трансформаторов при различных типах дефектов. Установлено наличие значимой связи как между газами характерными для данного типа дефекта, так и между сопутствующими газами. Показано, что количество газов, имеющих значимую корреляцию между собой, возрастает не только с ростом энергии, выделяемой при данном типе дефекта, но и от времени развития дефекта. Полученные результаты являются основанием для разработки статистических моделей дефектов, которые должны адекватно учитывать как количественное, так и качественное различие в газосодержании масел при различных типах дефектов.

Ключевые слова: хроматографический анализ растворенных в масле газов, тип дефекта, корреляция между газами, электрический разряд, термический перегрев, комбинированный дефект.

The new resistive circuit protection in high-voltage capacitor charge-discharge circuit powerful capacitive energy storage / M. I. Baranov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – С. 3-10. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

The new capacitance-resistance chart of defence of powerful capacity store of energy (CSE) is offered, the graphite-ceramic resistors of type of TVO-60 and module principle of construction of CSE are fixed in basis of which. The results of calculation estimation of basic parameters of the offered capacitance-resistance chart of defence of high-voltage condensers of powerful CSE of multimodule execution are resulted from emergency ever-currents. It is rotined that such chart of defence of powerful CSE not only in dozens of one times limits the current of short circuit through his power condensers in malfunction of work of CSE, caused the electric hasp of internal (external) isolation of condensers of such store of energy but also prevents explosion destruction of his protective graphite-ceramic resistors of type of TVO-60 on the stage of charge of high-voltage condensers of powerful CSE.

Key words: powerful capacity store of energy; high-voltage impulsive condenser; high-voltage protective resistor; emergency ever-currents.

High voltage processing unit for the synthesis of onion-like structured nanocarbon with the control system of gas discharge electrical characteristics / L. Z. Boguslavskii, D. V. Vinnychenko, N. S. Nazarova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – С. 11-23. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

The authors conducted the analysis of the conditions required for an electric discharge synthesis of nanocarbon. The usage of optimal control system of gas discharge electrical characteristics was proved. A system for controlling electrical characteristics of the gas discharge was designed. Control system was performed using modern digital technologies. It provides the implementation of complex multileveled tasks of the process' control. A high-voltage pulse generator was designed. It allows obtaining required wide range of discharge pulses' electrical characteristics. The basic technology solution for the implementation of an electric high-frequency synthesis method of amorphous nanocarbon with onion-like structure was developed. The high-voltage experimental appliance was produced. Developed appliance allows to improve performance of pure nanocarbon up to 20 grams per hour.

Keywords: high-frequency electric-discharge synthesis, amorphous nanocarbon with onion-like structure, the optimal control system, the electrical characteristics of the gas discharge, high-voltage processing unit.

Adaptive control algorithm for high-voltage impulse generator of electrofiltration system of gas emissions with different impedance / L. Z. Boguslavsky, L. N. Miroshnichenko, L. E. Ovchinnikova, S. S. Kozyrev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – С. 23-30. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0740.

The research of gas emissions with different impedance as an object of processing and high-voltage impulse generator as an object of control was done. As a result the informational coordinates and control action channels were defined. Based on the experimental research with simulated model of high-voltage equipment of electrofiltration system the set of control laws and knowledgebase for adaptive control system were developed. The adaptive control algorithm for impulse generator of electrofiltration system was developed. The algorithm provides adjustments of pulse parameters according to current gas burst composition. This allows generating high-voltage impulses which provide an efficient decomposition of major components of gas emissions. Defined information coordinates and channels of control actions. Base of knowledge based on the results of experimental studies on the prototypes were made of high voltage equipment complex systems electrofiltration.

Keywords: adaptive control; algorithm, switched power supplies; electrofiltration; different impedance gas bursts.

The features of resampling techniques in digital processing of multi-channel audio formats /A.A. Dovzhenko, V. B. Shvaichenko, O. Sharadjah // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 30-36. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

Special aspects of oversampling methods in digital processing of multichannel audioformats were determined for improvement of electromagnetic compatibility (EMC) of digital sound technical systems. Modeling was performed on a platform of universal software package Matlab. Was analyzed in the frequency domain digitized fragment of a musical work for 10 seconds in 5.1 audioformat. Study the effectiveness of channel multiplexing in the process of oversampling with the application of the delta-sigma modulation. Parameters of modern audio formats were compared in terms of EMC criteria. Proved the possibility of displacement of the spectral peaks of the digitized multi-channel digital audio stream content to reduce conducted emissions in the frequency range of the protected. Perspectives and advantages of the proposed method of direct digital flow spectral components compacting were evaluated and defined.

Keywords: multichannel audioformats, electromagnetic compatibility, digital processing, spectral peaks, digital sound technical systems.

Generator of electrophysical plants based on high-voltage pulse transformer / V.M. Ivanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 36-43. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-0740.

High tension generators, pulse transformers containing semiconductor IGBT switches in low-voltage transformer circuit had been created and successfully tested at the plant, with the sample of electrophysical installations for methane conversion as part of coke oven gas into synthesis gas using high-voltage pulse of volumetric discharges: corona and barrier. Break mode switch allows you to avoid limiting the amplitude of the pulse voltage at the load and fully convey the energy stored in the inductive storage. The voltage across the load is proportional to the magnetizing current at the time of the opening of the key and limits the voltage that can withstand without failure of the transistor switch if it is open.

Keywords: electrophysical plants, high-voltage pulse transformer, semiconductor switch, pulse corona discharge, pulse barrier discharge.

Design analysis of the experimental models of the blocking device for operative commutations / G.M. Koliushko, O.S. Nedzelskiy, H.G. Ponuzhdayeva, R.K. Borisov, D.I. Kovalev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 43-49. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-0740.

Design of four experimental models of the blocking device for operative commutations of high voltage electrical equipment is presented in this article. These devices are used in the high voltage (from 3 kV to 300 kV) apparatus of energetic objects. The devices that have been developed are appointed to complete the new "intellectual" systems to provide the safety blocking of operative commutations. These systems use the microcontrollers that allow to increase reliability and safety of the whole commutation system of energoobjects.

Advantages and some disadvantages of these experimental models are described. The analyses have been fulfilled by the specialists during the testing of the newest systems of the commutation management of the high voltage equipment. As the result of this analysis, the optimal version of device design without any disadvantages is given to acquaint in this article.

Keywords: blocking device for operative commutations; electromagnetic mechanism; operative safety blockings.

Energy mechanism of interaction of pulsed electromagnetic radiation with electronic systems in a mode of reversible failure / A.I. Korobko, Z.I. Korobko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 49-55. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0740.

A model of the energy interaction of ultra-wideband pulsed electromagnetic radiation of natural

and artificial origin with the radio electronic systems in the reversible failures mode is described. The analysis of the two main ways of the formation of false signals at the outputs of radio electronic systems that characterize reversible failures mode: interaction of pulsed electromagnetic radiation with the conductors of printed circuit boards and direct interaction of radiation with active semiconductor elements, which are components of radio electronic systems. The calculated topological scheme for the analysis of electromagnetic processes in branched radio-electronic systems is presented. The analysis of the practical applicability and realizability of numerical solutions for the calculated topology scheme was performed. The mechanism of interaction of pulsed electromagnetic field with the basic elements of radio electronic systems based on the energy characteristics of this interaction is considered. The results of the analysis of the energy mechanism of interaction are shown.

Keywords: pulsed electromagnetic field, radio electronic system, reversible failure, the printed circuit board.

Effect of an External Electromagnetic Radiation on the Spectrum of Surface Oscillations of Semiconductor Structures / V.I. Kravchenko, A.A. Serkov, V.S. Breslavets, I.V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 56-62. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields. The development of theory of interaction of microwave electromagnetic oscillations and charged particles in bounded plasma-like media and the study of kinetic and hydrodynamic beam instabilities in solid –like structures applied in the present microwave electronics is proposed. The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor superstructure have been determined. A new mechanism of initiation of surface at uneven of the conducting solid bodies is proposed. A theory of collisionless damping of surface plasmons in quantum and classical approximations is elaborated and the conditions of its conversion are determined. The effect of inhomogeneous properties of surface of open radiating structures on the spectral characteristics of transition radiation is studied. It is found that the energy losses related to excitation of volume helicons are equivalent to the energy losses of a magnetic moment created due to the charge rotation. New mechanism of excitation of surface magnitoplasmf oscillations by the moving radiation source are suggested.

Keywords: electromagnetic fields, vibrations, plasma, semiconductor superlattice, bezitknuvalne extinction, kinetic and hidrodinamichna instability, generation, Cherenkov and transition radiation, Helicon, charged particles, surface waves.

Impact of Side Electromagnetic Radiation on the Mechanism of the Interaction of Surface Oscillations with Conductive Electronsof Semiconductor Structures / V.I. Kravchenko, A.A. Serkov, V.S. Breslavets, I.V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 63-69. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

New mechanism of excitation of surface magnitoplasmf oscillations by the moving radiation source are suggested.

The development of theory of interaction of microwave electromagnetic oscillations and charged particles in bounded plasma-like media and the study of kinetic and hydrodynamic beam instabilities in solid –like structures applied in the present microwave electronics is proposed. The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor superstructure have been determined. The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields. A new mechanism of initiation of surface at uneven of the conducting solid bodies is proposed. A theory of collisionless damping of surface plasmons in quantum and classical approximations is elaborated and the conditions of its conversion are determined. The effect of inhomogeneous properties of surface of open radiating structures on the spectral characteristics of transition radiation is studied. It is found that the energy losses related to

excitation of volume helicons are equivalent to the energy losses of a magnetic moment created due to the charge rotation.

Keywords: electromagnetic fields, vibrations, plasma, semiconductor superlattice, bezitknuvalne extinction, kinetic and hidrodinamichna instability, generation, Cherenkov and transition radiation, Helicon, charged particles, surface waves.

Waveguide Characteristics of Semiconductor Components in the Presence of a Flow of Charged Particles / V.I. Kravchenko, A.A. Serkov, V.S. Breslavets, I.V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 69-75. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

A new mechanism of initiation of surface at uneven of the conducting solid bodies is proposed. The development of theory of interaction of microwave electromagnetic oscillations and charged particles in bounded plasma-like media and the study of kinetic and hydrodynamic beam instabilities in solid-like structures applied in the present microwave electronics is proposed. The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor superstructure have been determined. The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields. A theory of collisionless damping of surface plasmons in quantum and classical approximations is elaborated and the conditions of its conversion are determined. The effect of inhomogeneous properties of surface of open radiating structures on the spectral characteristics of transition radiation is studied. It is found that the energy losses related to excitation of volume helicons are equivalent to the energy losses of a magnetic moment created due to the charge rotation. New mechanism of excitation of surface magnitoplasmf oscillations by the moving radiation source are suggested.

Keywords: electromagnetic fields, vibrations, plasma, semiconductor superlattice, bezitknuvalne extinction, kinetic and hidrodinamichna instability, generation, Cherenkov and transition radiation, Helicon, charged particles, surface waves.

Waveguide Characteristics of Semiconductor Superlattice under the Influence of Electromagnetic Radiation / V.I. Kravchenko, A.A. Serkov, V.S. Breslavets, I.V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 76-81. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

The development of theory of interaction of microwave electromagnetic oscillations and charged particles in bounded plasma-like media and the study of kinetic and hydrodynamic beam instabilities in solid-like structures applied in the present microwave electronics is proposed. The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor superstructure have been determined. The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields. A new mechanism of initiation of surface at uneven of the conducting solid bodies is proposed. A theory of collisionless damping of surface plasmons in quantum and classical approximations is elaborated and the conditions of its conversion are determined. The effect of inhomogeneous properties of surface of open radiating structures on the spectral characteristics of transition radiation is studied. It is found that the energy losses related to excitation of volume helicons are equivalent to the energy losses of a magnetic moment created due to the charge rotation. New mechanism of excitation of surface magnitoplasmf oscillations by the moving radiation source are suggested.

Keywords: electromagnetic fields, vibrations, plasma, semiconductor superlattice, bezitknuvalne extinction, kinetic and hidrodinamichna instability, generation, Cherenkov and transition radiation, Helicon, charged particles, surface waves.

Hierarchical system condition monitoring of high-voltage generators of pulsed currents / N. S. Nazarova D. V. Vinnychenko, D. V. Vinnychenko, Yu. O. Adamchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 82-92. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0740.

The authors conducted the analysis of process' control tasks in the discharge circuit of the pulse currents generator for discharge-pulse technologies. They analyzed the ways of controlling mode of operation of the generator based on the usage of the discharge current pulse's parameters as informational coordinates. The creation of the generator's current state monitoring system based on the principles of modularity, hierarchy, and usage of the shared resources and powerful real-time computing systems was proved. The authors developed a circuit implementation for the monitoring system based on the designed industrial controller. They also conducted its testing in a pilot appliance for the discharge-pulse technology of bored piles production. Designed monitoring system can be used in control systems for discharge-pulse technologies in the conditions of large pulsed currents in the appliances' electrical circuits.

Keywords: hierarchical monitoring system, pulse currents generator, discharge-pulse technology.

Generator intended for testing of the BAO on susceptibility to fast transient/burst, caused lightning ("multiple strokes" of the form 4) IGLA-MKU-4 / Y.S.Nemchenko; V.V.Kniyaziev, I.P.Lesnoy; S.B.Somhiev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 92-98. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-0740.

The construction and the attestation testing of the generator are described. The generator intended for testing of the on-board aircraft equipment on susceptibility to fast transient/burst, caused lightning, according to International standards DO-160G / ED-14G. The apparatus generates the mission profile of the form #4 test voltage on a five levels. Tests are conducted by method "Cable injection". In addition, in a generator possibility is foreseen of automatic creation of the voltages test pulses. It is such options: amount of proof-of-concept impulses (no less than 10) and intervals between them (5, 10, 20 and 60 s). The generator passed primary attestation with participation of the representatives from the State Metrology Service. The generator have a correspond certificate. The generator is entered exploitation and used for the tests of the on-board aircraft equipment immunity to the transients caused by lightning. Test realized by a method "frequent shots".

Keywords: test, on-board aircraft equipment, susceptibility, lightning, transients, generator, attestation.

Inductive transformer of impact magnetic field of lightning / Y.S. Nemchenko; S.P. Shalamov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 99-108. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

The spheres of use of ultrawideband measuring device of magnetic field tensity of inductive type are analyzed in the article. Brief theoretical information for choosing the parameters of the transformer are given. The article also shows the conditions for correct work of the transformer. It was calculated the perceptibility of the transformer. The calculated and experimental perceptibility were compared. The inaccuracy of measuring was determined. The results of realization of ultrawideband measuring device of magnetic field tensity of inductive type for measuring biexponential magnetic field impulse are represented in the article. The parameters of produced transformer are cited. The work of the transformer while signal influencing on its scheme is modeled using Micro-Cap programme. The signal's parameters are equivalent to a signal generated in Helmholtz rings system. Transformer's calibration is conducted.

Keywords: impact magnetic field, electromagnetic induction, biexponential impulse, inductive transformer's calibration, Helmholtz rings.

The system of two ECS for organization of test current pulses with a monotonic rise and fall values / AA Petkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 109-115. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

The purpose of this paper is to obtain relations and the development of procedures for the elements selection of the test device, which contains two energy capacitive storage. The analytical methods of data transformation, similarity theory, experimental design and circuit simulation of transients were used in the work for obtaining of the results. The models of amplitude-time parameters of pulse current in the load were obtained in this paper. Shows the dependence of the decay time values divided by the rise time values. Found model to determine the action integral. All models are presented in dimensionless form. The relation that links the parameters of device elements at a fixed ratio of time parameters of the current pulse was deduced. The method for determining of the element parameters of the test circuit was suggested. The article materials may be used for further studies of testing devices which include several energy capacitor storages.

Keywords: energy capacitive storage, the current pulse, amplitude and time parameters.

Modeling techniques to estimate EMC of sound system with switched-mode power supply and Class-D amplifier / V. V. Pilinsky, D.M. Probity, A.A. Dovzhenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 115-122. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

The known techniques of interference simulation in switching mode operating audio units analyzed. The approach to create a model in the freeware SPICE environment LTSpice offered, with the Line Impedance Stabilization Network and the sound system units' switched-mode operation issues taken into account for conducted interference prediction. Conducted interference estimation depending on the load changes at the output of the Burst Mode operating power source carried out. The developed model makes electromagnetic compatibility parameters estimation possible for different values of the audio frequency, load, class D modulation aspects and SMPS modes yet at the design stage. Analysis of simulation results summarized in the paper demonstrates the fundamental possibility of up to 20 dB output noise level reducing at the frequency of 1 MHz by means of the switched-mode power source oscillating frequency changing.

Keywords: electromagnetic environment, circuit simulation, Class D amplifier, switched-mode power supply, electromagnetic compatibility, combined effect.

Hardware-software system for measuring the electric field intensity / I.O. Postilnyk, V.V. Kniaziev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 123-128. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

This article provides a description of hardware and software designed to measure the shielding properties of electrical equipment, as well as being the ability to use it as a feedback system, for automatic gain control (AGC). Presented in this article, hardware-software system is a universal solution and can be used in both cases above. A step by step implementation of hardware and software is described. Are described the hardware design solutions. This paper presents the problem of using coaxial lines in the measurements of the screening properties. Special attention is focused for using optical line for data exchange. The advantage is to determine the r.m.s value of the electric component, defining it in terms of the amplitude of the detected signal. Describes the functionality of the interface of the software. The advantages of hardware-software complex are presented, allowing for the automation of research shielding properties of buildings, using the personal computer as a device for registration and display of measured values.

Keywords: electric field meter of fiber-optic line, a hardware-software complex logarithmic detector, EMC, shielding properties.

Resonance spectra of inhomogeneous coaxial resonators to determine the dielectric constant of liquids in the microwave range / V.V. Rudakov, A.A. Korobko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 129-137. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.

The analysis of the frequency spectrum of the classical homogeneous coaxial resonator with an electrical length of $1/4$ of the wavelength and inhomogeneous coaxial resonator lines with different wave resistances. The frequency spectrum of the classical resonator is characterized by low frequency separation of the first and second resonances, so it can be used only in circuits with the study of the amplitude-frequency characteristics for determining the dielectric constant of the medium filling it. A new type of inhomogeneous coaxial resonator lines with different wave resistances is proposed. The frequency spectrum of inhomogeneous resonator is characterized by sharp (up to 4-fold) decrease in the first resonant frequency and a significant (5 fold) increase in separation the first and second ones. Inhomogeneous resonator has 4 times smaller geometric length and can be used in the free oscillation mode of the measuring generator. Inhomogeneous resonator allows the measurement of the dielectric constant of the medium in an extended frequency range from tens of MHz to 1.8 GHz.

Keywords: resonance spectra, inhomogeneous coaxial resonator, absolute permittivity, liquid medium.

The influence of working medium composition on the amplitude of pressure wave of high voltage electric discharge / A.S. Torpakov, O.N. Sizonenko, E.M. Sheregii, S.V. Prokhorenko, E.I. Taftai // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 138-148. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

Results of experimental study of pressure wave amplitude with piezoelectric waveguide sensor during high voltage electric discharge (HVED) in water, water with addition of Ti powder, kerosene and kerosene with addition of Ti powder are given. Comparison of experimental and calculated amplitude values is performed. Influence of continuous medium type, disperse phase concentration and discharge circuit parameters on pressure amplitude is experimentally found out. Addition of Ti powder in kerosene with a weight ratio of solid and liquid phases of $1/9$ leads to a ~ 3 times reduction of the pressure amplitude of the HVED, and of a ratio of $1/18$ – to its ~ 1.5 times reduction compared with the case of HED in kerosene. Previously adapted model of hydrodynamic characteristics of HVED in disperse systems "metal powder - kerosene" should be developed further taking into account the role of fluid viscosity, storage capacity in the range of less than $1 \mu\text{F}$ and deviation to the equatorial plane of the discharge.

Keywords: electric discharge, titanium powder, concentration, pressure amplitude, disperse system.

A features of streamer crown are from cored air terminals / O.Y. Chernukhin, V.V. Kniaziev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 149-155. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0740.

In the article the results of experimental researches of streamer crown are presented from cored air terminals in a pre thunderstorm period. On the basis of statistical treatment of results empiric dependence of amount of single streamers is set in a corona digit from tension of electric-field there is air terminal in that. A substantial difference is well-proven in character of dependence for the bar of square section flat-top and bar of circular section with a sharp top. It is set that corona digit from a sharp bar in the range of tension of electric-field from 6 kV/m to 10 kV/a m ceases. The following frequency arrives at 6 kG at the height of tension of field E to 30 kV/m . It is set that frequency of the following of streamers for the case of bar of square section has the determined character: with the height of tension of E -field the following frequency droningly increases with a coefficient near to $0.25 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1} \text{ m}$. Value of standard deviation at other equal terms for the case of square bar on an order less than, what for the case of sharp bar.

Keywords: pre thunderstorm period, streamer crown, number of single streamers, tension of electric-field, cored air terminal.

The relevance of voltage quality considering in electrical energy accounting / S. U. Shevchenko, V. V. Volokhin, I. M. Diahovchenko, D. M. Makukha // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – C. 156-165. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

The electricity meters used in electric distribution networks are based on a conventional definition of active and reactive energy (or power) for sinusoidal voltages and currents, containing only the fundamental frequency component. Today there is not enough attention paid to the problems of voltage quality distortions. Meanwhile different deviations of voltage in electric grids can lead to inaccuracies in power accounting. As a consequence, the performances of energy meters in the presence of these deviations need to be improved. Especially it is actual for such quality indicators as voltage deviation from standard values, voltage fluctuations, the nonsinusoidal voltage, voltage unbalance, voltage dips, voltage pulses and temporary overvoltages. In this work it is made the analysis of these factors, considered their influences on electric meters work and mentioned the main sources of such distortions. Also the methods of voltage deviations considering are determined.

Keywords: the meter, electricity meter, electric energy, voltage, asymmetry, deviation, influence, issue.

Analysis of correlation between the gases dissolved in transformer oil of power, when developing various types of defects / O. Shutenko, D. Baklaj // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – С. 166-176. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

The tightness of correlation communication between the gases dissolved in oil of power transformers at various types of defects are investigated. Presence of significant communication as between gases characteristic for the type of defect, and between accompany gases are established. It is shown that the quantity of the gases significant correlation among themselves, increased not only with growth of the energy allocated at type of defect, but also from time of development of defect. The received results are the basis for working out of statistical models of defects which should consider adequately both quantitative, and qualitative distinction in content gas of oils at various types of defects.

Keywords: Chromatographic analysis of the dissolved gases in the oil, the type of defect, the correlation between the gases, electric discharge, thermal overheating, the combined defect.

ЗМІСТ

Баранов М.И. Новая резистивная схема защиты высоковольтных конденсаторов в зарядно-разрядных цепях мощных емкостных накопителей энергии	3
Богуславський Л.З., Вінниченко Д.В., Назарова Н.С. Високовольтна установка для синтезу нановуглецю з opion-like структурою з системою керування електричними характеристиками газового розряду	11
Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н., Овчинникова Л.Е., Козырев С.С. Алгоритм адаптивного управления импульсным высоковольтным источником питания системы электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов	23
Довженко А.О., Швайченко В.Б., Шарадга О. Особливості методу ущільнення багатоканального звукового контенту	30
Иванов В.М. Генератор электрофизической установки на основе высоковольтного импульсного трансформатора	36
Колиушко Г.М., Недзельский О.С., Понуждаева Е.Г., Борисов Р.К., Ковалев Д.И. Анализ конструкций опытных образцов устройства блокировки оперативных переключений	43
Коробко А.И., Коробко З.И. Энергетический механизм взаимодействия импульсных электромагнитных излучений с радиоэлектронными системами в режиме обратимых отказов	49
Кравченко В.И., Серков А.А., Бреславец В.С., Яковенко И.В. Влияние стороннего электромагнитного излучения на спектр поверхностных колебаний полупроводниковых структур	56
Кравченко В.И., Серков А.А., Бреславец В.С., Яковенко И.В. Воздействие стороннего электромагнитного излучения на механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур	63
Кравченко В.И., Серков А.А., Бреславец В.С., Яковенко И. В. Волноводные характеристики полупроводниковых комплекующих электро-радиоизделий при наличии потока заряженных частиц	69
Кравченко В.И., Серков А.А., Бреславец В.С., Яковенко И.В. Волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки в условиях влияния электромагнитного излучения	76

Назарова Н.С., Вінниченко Д.В., Вінниченко І.Л., Адамчук Ю.О. Ієрархічна система моніторингу поточного стану високовольтних генераторів імпульсних струмів	82
Немченко Ю.С., Князев В.В., Лесной І.П., Сомхив С.Б. Генератор для испытаний восприимчивости БАО к переходным процессам, вызванных молнией «ИГЛА-МКУ-4» («многократные удары» форма 4)	92
Немченко Ю.С., Шаламов С.П. Индукционный преобразователь импульсного магнитного поля молнии	99
Петков А.А. Система двух ЕНЭ для формирования испытательных импульсов тока с монотонным нарастанием и спадом значений	109
Пилинский В.В., Пробитый Д.М., Довженко А.А. Методы моделирования для оценки электромагнитной совместимости звукотехнических систем с импульсными источниками питания и усилителями класса D	115
Постельник И.А., Князев В.В. Аппаратно-программный комплекс для измерения напряженности электрического поля	123
Рудаков В.В., Коробко А.А. Резонансные спектры неоднородных коаксиальных резонаторов для определения диэлектрической проницаемости жидких сред в СВЧ диапазоне	129
Торпаков А.С., Сизоненко О.Н., Шерегий Е.М., Прохоренко С.В., Тафтай Э.И. Влияние состава рабочей среды на амплитуду волны давления высоковольтного электрического разряда	138
Чернухин А.Ю., Князев В.В. Особенности стримерной короны со стержневых молниеприемников	149
Шевченко С.Ю., Волохін В.В., Дяговченко І.М., Макуха Д.М. Актуальність урахування впливу показників якості напруги при обліку електричної енергії	156
Шутенко О.В., Баклай Д.М. Аналіз кореляційних зв'язків між газами, розчиненими в маслі силових трансформаторів, при різних типах дефектів	166
Реферати	177
Рефераты	184
Abstracts	191

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:

Техніка та електрофізика високих напруг

№ 20 (1129)

Науковий редактор: д-р техн. наук, проф. В. І. Кравченко

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

Відповідальний за випуск: канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

НТУ «ХПІ». НДПКІ «Молнія».

Тел. (057) 707-63-09. E-mail: vavriv@rambler.ru

Обл.-вид № 18-15.

Підп. до друку 28.04.2015 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.

Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,75. Облік.-вид. арк. 10.

Тираж 300 пр. 1-й завод 1-100. Зам. № 23. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Друкарня ВАТ «Цифра Прінт».

Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.

Адреса: 61166, м. Харків, вул. Данилевського, 30.
