

**С.Ю. АНТОНЕЦ**, инженер-технолог, ЗАТ «Завод Південкабель», Харьков;  
**Л.А. ЩЕБЕНЮК** к.т.н., проф., НТУ «ХПИ»

### К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИЗОЛЯЦИИ ЭМАЛЬПРОВОДА С ИЗОЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДНЫХ СОПОЛИМЕРОВ

Выполнено моделирование электрического поля в эмальизоляции, оценен размер области концентрации напряженности вокруг дефекта поверхности проводника. Новые для отечественной промышленности эмальпровода с изоляцией из полиимидных сополимеров имеют очень высокие электрофизические характеристики, в том числе, высокий уровень пробивных напряжений.

**Ключевые слова:** эмальпровод, дефект медного провода, напряженность электрического поля.

**Постановка проблемы.** Для изоляции эмальпроводов практически не пользуются понятием напряженности электрического поля: определяют экспериментально и нормируют пробивное напряжение [1]. Такой подход обусловлен опытом и объясним теоретически тем, что при толщинах изоляции, как минимум на порядок меньших радиуса кривизны электрода, и отсутствии закраин, электрическое поле в изоляции близко к однородному. Новые для отечественной промышленности эмальпровода с изоляцией из полиимидных сополимеров, имеют очень высокие электрофизические характеристики, в том числе, высокий уровень пробивных напряжений. Одновременно возник вопрос о влиянии локальных неоднородностей поверхности проволоки на пробивное напряжение, поскольку разброс значений пробивных напряжений значителен [2].

**Анализ литературы.** В фундаментальных исследованиях пробоя диэлектриков мерой электрической прочности, являющейся физической характеристикой материала, принимают напряженность электрического поля при пробивном напряжении, измеренном в однородном электрическом поле [3]. Испытания для определения напряжения пробоя (breakdown voltage  $U$ ) эмальпроводов с изоляцией на основе полиимидных сополимеров в европейской лаборатории [1] свидетельствуют о том, что одной из основных причин нестабильности

© С.Ю. Антоненко, Л.А. Щебенюк, 2014

$U$  является состояние поверхности медного проводника перед эмальированием. Поэтому оценка напряженности электрического поля у дефектов поверхности медного проводника является необходимым этапом в анализе причин значительного разброса значений пробивных напряжений изоляции эмальпроводов.

**Цель работы.** Экспериментальное исследование дефектов поверхности проводника эмальпровода ППЭИДХ – 0,56 и оценка напряженности электрического поля у типичных дефектов поверхности.

**Основные результаты.** Выполнены исследования поверхности медного проводника эмальпровода марки ППЭИДХ – 0,56 по мере прохождения маршрута эмальирования при наложении основного (полиэфиримидного, ПЭИ) эмальлака. Данные после выхода из первых четырех калибров маршрута эмальирования, после которых толщина высушенного лака не превышает 6 мкм и его прозрачность достаточна для детального исследования поверхности проволоки с помощью металлографического микроскопа, позволили все неровности поверхности провода разделить на четыре основные группы: 1) наиболее типичная, представляющая собой следы волочения проволоки – продольные бороздки шириной от 10 мкм до 50 мкм (чаще большие значения) и глубиной до приблизительно 5 мкм; 2) отдельные овальные и овально-продолговатые углубления глубиной до 5 мкм (названные нами «раковины») и размером до 0,002 мм<sup>2</sup>; 3) волнообразные поперечные неровности на поверхности меди с высотой «волны», не превышающей (2 – 3) мкм, покрывающие поверхность провода своеобразной «рябью»; 4) медная пыль, не превышающая размером 1 мкм.

Наиболее типичной и одновременно имеющей наибольший размер выбрана полу-цилиндрическая выпуклость, расположенная параллельно оси проволоки, радиусом  $\xi = 5 \pm 2$  мкм.

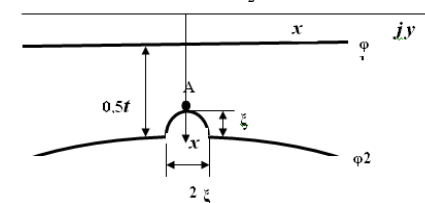


Рис. 1 – Модель типичного дефекта на поверхности проводника в виде полу-цилиндрической выпуклости радиусом  $\xi$ , расположенной параллельно оси проволоки:  $t$  – толщина эмальизоляции

Приведенная на рис. 1 модель использована для расчета максимальной напряженности у дефекта на поверхности проводника в различных реальных расположениях электродов при испытаниях:

1) для случая испытания на скрутках (параллельные одинаковые цилиндры) горизонтальная прямая – ось симметрии поля;

2) для случая испытания на проход в роликовых электродах (цилиндр малого радиуса против цилиндра большого радиуса) горизонтальная прямая – фрагмент цилиндра большого радиуса.

Для модели, представленной на рис. 1 применено известное решение плоской полевой задачи в системе плоскость и параллельный ей цилиндр [4]. Отличие представленной на рисунке модели в том, что проводник, которому принадлежит выступ, также влияет на максимальную напряженность. Если учесть, что таких цилиндрических выступов много и они расположены параллельно, то может быть применена известная модель, с помощью которой определяют максимальную напряженность у жилы, скрученной из одинаковых круглых проволок. Преимущество первой модели в том, что она дает возможность определить напряженность в любой точке пространства вокруг цилиндра, а указанное выше отличие обеспечивает оценку максимальной напряженности снизу. Вторая модель дает возможность определить напряженность в одной точке, самой близкой к внутренней поверхности коаксиального цилиндра, радиус которого больше на толщину изоляции. То есть эта модель обеспечивает оценку максимальной напряженности сверху.

Влияние дефектов поверхности электродов на распределение электрического поля в диэлектрике – классическая задача электростатики, аналитическое решение которой находят с помощью конформных преобразований. Решение в системе плоскость и параллельный ей цилиндр основано на конформном преобразовании системы плоскость и параллельный ей цилиндр, изображенной в комплексной плоскости  $Z(x; jy)$ , с помощью превращения системы координат  $W = 1/Z$  в комплексную плоскость  $W(u; jv)$ :

$$u = x/(x^2 + y^2); v = -y/(x^2 + y^2). \quad (1)$$

При этом условие Коши-Римана о равенстве частных производных выполняется:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2}; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{-2xy}{(x^2 + y^2)^2}, \quad (2)$$

Следовательно, в обеих системах координат разности потенциалов на неограниченно близких расстояниях одинаковы:  $dU = -E_w dW = -E_z dZ$ , откуда неизвестная напряженность электрического поля в

плоскости  $Z$  определяется известной напряженностью в системе двух коаксиальных цилиндров в  $W$ . При этом расположение точек в двух плоскостях различно (см. рис. 2), что необходимо учитывать при определении неизвестной напряженности электрического поля.

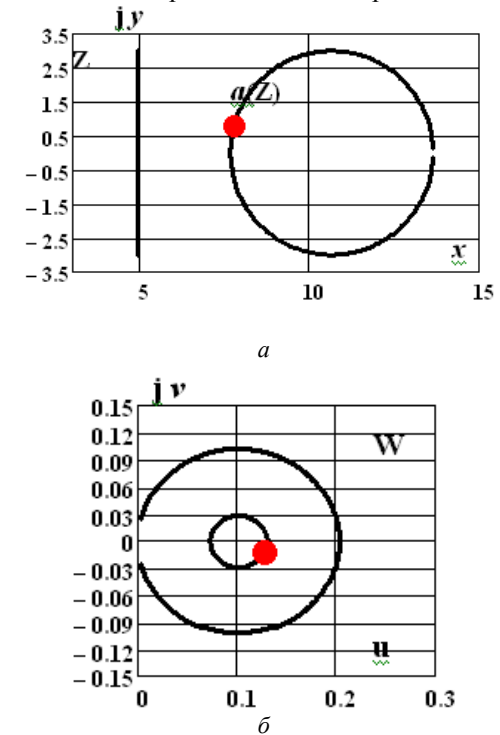


Рис. 2 – Иллюстрация расположения точки  $a$  при преобразовании системы плоскость и параллельный ей цилиндр, изображенной в комплексной плоскости:  $a - Z(x; jy)$  с помощью преобразования системы координат  $W = 1/Z$  в комплексную плоскость  $б - W(u; jv)$

Для определения напряженности в любой точке пространства вокруг цилиндра радиусом  $r$  (например, рис. 1, точка А) важно то, что указанное преобразование позволяет аналитически построить эквипотенциали в плоскости  $Z$  путем двойного комплексного преобразования, что иллюстрирует рисунок 3.

Для модели, изображенной на рис. 1 максимальная напряженность электрического поля при пробивном напряжении

определена соотношением согласно [4] с помощью конформного преобразования:

$$E_{\text{пр}}(\xi) = U_{\text{пр}}/2 \cdot (x_A - a x_A^2) \cdot \ln \{ a / [a^2 - (x_0 + 0,5t)^2 - \xi^2]^{-1} \}^{0,5}, \quad (3)$$

где  $x_A$  – координата точки А, лежащей на оси  $x$  в комплексной плоскости  $Z(x; jy)$ ;  $x_A = x_0 + 0,5t - \xi$ ;

$U_{\text{пр}}$  – пробивное напряжение, определенное экспериментально на двойной толщине эмальизоляции;  $t$  – диаметральной толщина эмальизоляции, определенная экспериментально как разность диаметров проводника и изолированного провода;  $\xi$  – размер типичного дефекта в виде полу-цилиндрической выпуклости, расположенной параллельно оси проволоки;  $x_0$  – расстояние от эквипотенциала  $\varphi^1$  до оси  $jy$ ;  $x_0 = [(0,5t - \xi)^2 - \xi^2]^{0,5}$ ;  $a$  – координата центра коаксиальных окружностей в комплексной плоскости  $W(u; jv)$ , соответствующих эквипотенциалам  $\varphi^1$  и  $\varphi^2$  в комплексной плоскости  $Z(x; jy)$ :

$$a = \{2 \cdot [0,5t - \xi]^2 - \xi^2\}^{-1}. \quad (4)$$

При этом необходимо учитывать, что точки, практически совпадающие на эквипотенциалах в плоскости  $W$  могут иметь различное положение на соответствующей эквипотенциалах в плоскости  $Z$ .

Параметры конформного преобразования различны для разных калибров маршрута, поскольку различна толщина изоляции, от которой зависит положение системы координат в плоскости  $Z$ . Выбор системы координат определен условием совпадения центров окружностей в плоскости  $W$ .

Модель на рис.1 (плоскость и параллельный ей цилиндр) и формула (3) использованы для оценки влияния характерных для данного провода выступов на максимальную напряженность в эмальизоляции, поскольку выступ малого радиуса закругления создает область повышенной напряженности, которая может определять локализацию пробоя и пробивное напряжение.

При допущениях относительно однородности изоляции, малого размера дефекта по сравнению с размером проводника, цилиндрической поверхности дефекта, вероятными являются две различные тенденции относительно влияния его размера на максимальную напряженность электрического поля в точке А.

Первая заключается в том, что чем меньше радиальный размер дефекта, тем концентрация напряженности электрического поля в точке А выше. Вторая заключается в том, что чем меньше радиальный размер дефекта, тем больше, при прочих равных, толщина изоляции у этой точки.

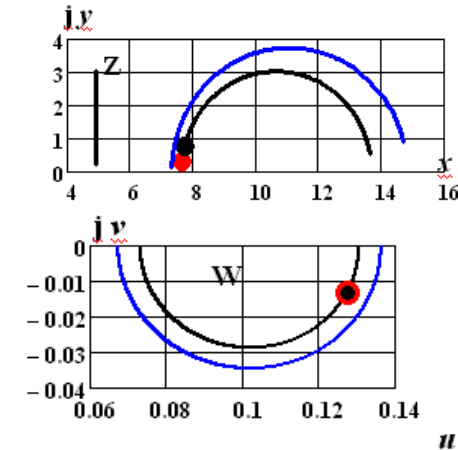


Рис. 3 – Иллюстрация расположения точек на эквипотенциалах при двойном комплексном преобразовании системы плоскость и параллельный ей цилиндр, изображенной в комплексной плоскости  $Z(x; jy)$ , в комплексную плоскость  $W(u; jv)$

На рис. 4 приведены результаты расчетов с помощью (3), выполненные для различных значений размера дефекта (в диапазоне наблюдаемых экспериментально), и для различных экспериментально определенных значений толщины изоляции и пробивного напряжения.

Рисунок 4 отражает указанные тенденции в диапазоне толщин изоляции, нанесенных после калибров № 3 и № 4. Ни одна из указанных тенденций не является преобладающей при значениях  $\xi / 0,5 t$  от 0,3 до 0,5.

Важно то, что за пределами значений соотношения  $\xi / 0,5 t$  от 0,3 до 0,5 зависимости максимальной напряженности электрического поля при пробое от размера дефекта для различных экспериментально определенных значений толщины изоляции имеют такой характер, который позволяет предположить наличие других тенденций.

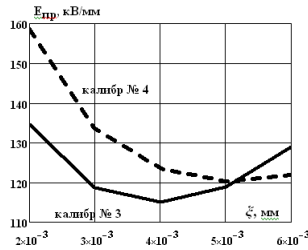


Рис. 4 – Зависимости максимальной напряженности электрического поля при пробое от размера дефекта (модель на рис. 3.8) для различных экспериментально определенных значений толщины изоляции: калибр № 3:  $0.5t = 0,011$  мм; калибр № 4:  $0.5t = 0,015$  мм

Высокие расчетные значения максимальной напряженности электрического поля при пробое для толщины изоляции, равной размеру дефекта (калибр № 2) могут быть объяснены только тем, что первые слои эмальлака обволакивают всю поверхность проводника, примерно повторяя его рельеф.

Таким образом, для однородной изоляции, малого размера дефекта по сравнению с размером проводника, цилиндрической поверхности дефекта, вероятными являются две различные тенденции относительно влияния его размера на максимальную напряженность электрического поля в точке А. Первая заключается в том, что первые слои эмальлака обволакивают всю поверхность проводника, примерно повторяя его рельеф. Тем самым отражается свойство адгезии жидкого лака к медному проводнику.

Вторая отражает влияние дефектов поверхности проводника на напряжение пробоя по мере прохождения маршрута эмалирования.

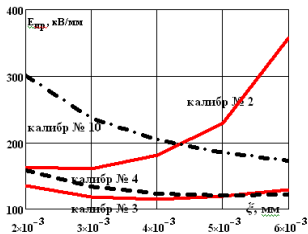


Рис. 5 – Расчетные зависимости максимальной напряженности электрического поля от размера дефекта для различных экспериментально определенных значений толщины изоляции

Расчет максимальной напряженности электрического поля у поверхности проводника с помощью конформного преобразования системы координат позволил проанализировать влияние дефектов поверхности проводника на напряжение пробоя по мере прохождения маршрута эмалирования.

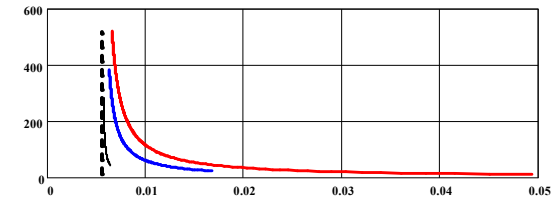


Рис. 6 – Распределение напряженности электрического поля  $E=f(x)$ , где  $E$  в кВ/мм,  $x$  в мм вдоль эквипотенциал в изоляции провода

**Выводы:** Аналитическое построение эквипотенциалей в плоскости  $Z$  позволило моделировать электрическое поле в эмальизоляции: – оценить размер области концентрации напряженности вокруг дефекта поверхности проводника (рис. 6), из которого видно, что напряженность вдоль эквипотенциали быстро снижается, а область концентрации напряженности вокруг дефекта поверхности не превышает 2 мкм; – оценить влияние размеров неоднородностей на напряженность электрического поля в эмальизоляции.

**Список литературы:** 1. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p.18. 2. Л.А. Щебенюк, С.Ю. Антонеч Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емаль проводів. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 23. – С.166 – 169. 3. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Сканави Г.И. – М.: Физматиздат, 1958. – 908 с. 4. В.П.Карпушенко. Силовые кабели низкой та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / В.П.Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.О. Антонеч, О.А. Науменко – Х.: Регіон-інформ, 2000.– С. 235–269.

**Bibliography (transliterated):** 1. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. 2. L.A. Shhebenjuk, S.Ju. Antonec' Statistichnij aparat zabezpechennja bezdefektnosti produkcii v virobnictvi emal' provodiv. Vistn. Har'k politehni-ta. Harkiv: NTU «HPI», 2012. No. 23. 166 – 169. Print 3. Skanavi G.I. Fizika dijelektrikov (oblast' sil'nyh polej). Moscow: Fizmatizdat, 1958. 4. Karpushenko V.P., Shhebenjuk L.A., Antonec' Ju.O., Naumenko O.A. Silovi kabeli niz'koj ta seredn'oi naprugy. Konstrujuvannja, tehnologija, jakist': Kharkov: Region-inform, 2000.

Надійшла (received) 01.03.2014

**С.Ф. АРТИУХ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**Н.А. ЛЮБИМОВА**, канд. техн. наук доц., НТУ «ХПИ»;

### ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

В статье выполнена оценка параметров случайных процессов загрязнения окружающей среды энергетическими предприятиями, проведен анализ реализаций процессов загрязнения, а также анализ гистограмм, распределения значений процессов загрязнения.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы, закон распределения, обработка, компонент атмосферного загрязнения.

**Введение** Энергетика является основным движущим фактором развития всех отраслей народного хозяйства. В то же время энергетическая промышленность вносит свой весомый антропогенный негативный вклад в загрязнение водного и воздушного до 32% бассейнов Украины. Так, например, в дымовых уходящих газах топливосжигающих установок содержатся оксиды углерода до 50%, оксиды серы до 20%, оксиды азота до 8%, углеводороды (5-20) %, сажа, минеральные производственные включения и другие. В атмосферу сбрасываются также более 200 высокотоксических веществ, а вместе с выходящими выхлопными и отработавшими газами и нагретой водой около (60 – 80) % всей полученной при сжигании углеводородного топлива теплоты. Что дополнительно приводит к тепловому загрязнению атмосферы.

Процессы загрязнения – это элементы технологической цепи, стабильность и точность функционирования которой, определяют стационарность и статическую предсказуемость появления таких нежелательных случайных событий, как экстремальные превышения норм природопользования (ПДВ, ПДС) в виде выбросов и сбросов [1].

Такие нарушения порождают дополнительную неопределенность при контроле процессов технологического загрязнения, усложняя вероятностные свойства и динамические особенности процессов [2].

Динамические модели многокомпонентных процессов загрязнения атмосферы и водных источников представлены рис. 1, а, б и 2, а, б. На них изображены типичные реализации процессов воздушного загрязнения выбросами ТЭС рис. 1, а, б и реализации процессов

© С.Ф. Артиух, Н.А. Любимова, 2014

фенольного загрязнения воды сбросами см. рис. 2, а, б [3].

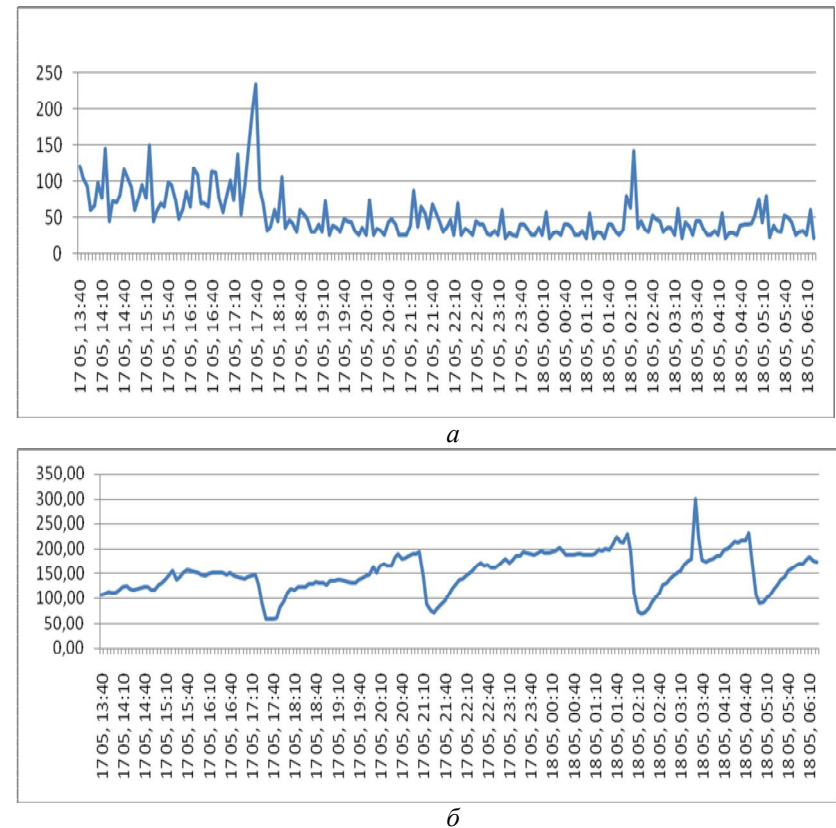
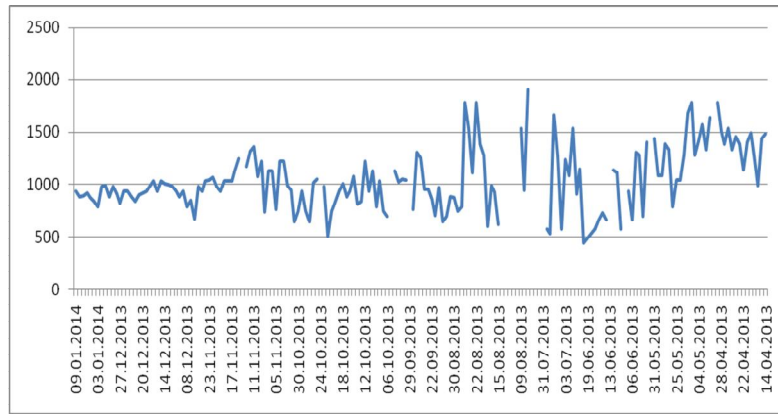


Рис. 1 – Типичные реализации загрязнения атмосферы физико-химическими компонентами отходов ТЭС: а – пыль; б – SO<sub>2</sub>

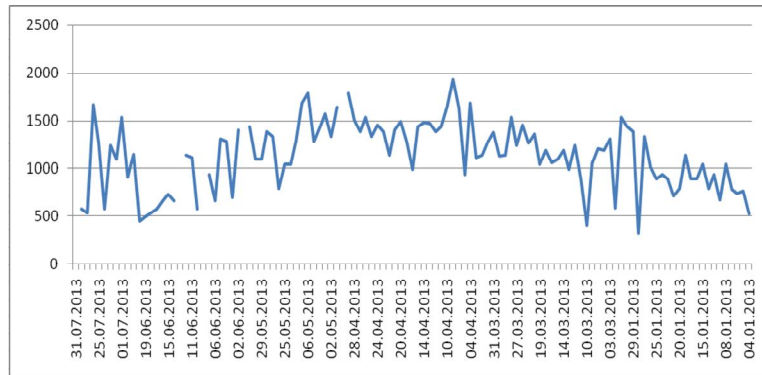
Из рис. 1, а, б видно, что случайные процессы количественного изменения компонент атмосферного загрязнения отличаются сложными видами нестационарности одновременно по математическому ожиданию, спектру и закону распределения вероятностей.

Реализации рис. 2 отличаются меньшей динамикой, чем процессы на рис. 1. Однако, здесь также имеет место достаточно сложная нестационарность по математическому ожиданию и дисперсии.





а



б

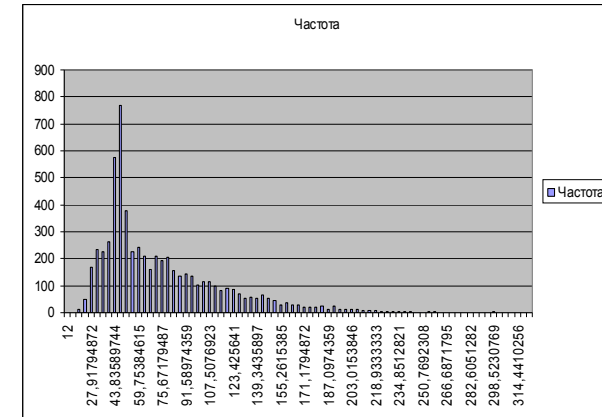
Рис. 2 – Типичные реализации загрязнения воды фенолами в сбросах: а – начало; б – середина технологического цикла

Оценка стационарности и спектральных особенностей приведенных процессов загрязнения позволит уменьшить априорную неопределенность и дает возможность для усовершенствования последующего контроля.

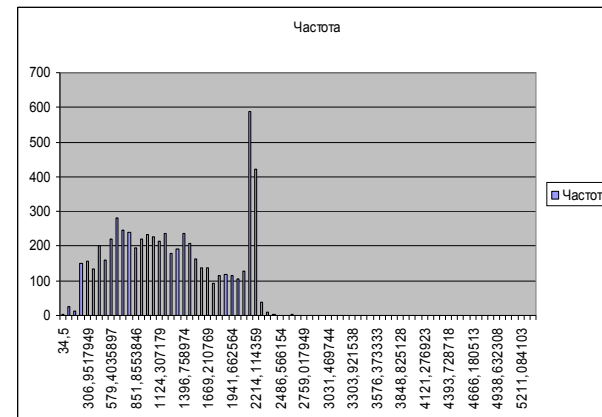
#### Законы распределения и моменты загрязняющих выбросов

Следует отметить, что реальные процессы загрязнения в большинстве случаев не являются гауссовскими процессами. На рис. 3, а, б представлены гистограммы законов распределения компонент «пыль» и

«SO<sub>2</sub>» в процессах загрязнения воздушной среды отходами тепловых электростанций.



а



б

Рис. 3 – Типичные гистограммы законов распределения вероятностей в компонентах процессов воздушного загрязнения ТЭС: а – пыль; б – SO<sub>2</sub>

Гистограммы рис. 3, а, б наглядно показывают несимметричность законов распределения процессов загрязнения и их отличие от вероятностной модели нормального закона.

В таблице 1 представлены точечные оценки числовых характеристик случайных процессов загрязнения по компонентам: «пыль», «SO<sub>2</sub>», «NO<sub>x</sub>», «CO», «O<sub>2</sub>», (объем выборок N=6152 точки).

Из таблицы 1 видно, что коэффициенты асимметрии и эксцесса для контролируемых компонент загрязнения отличаются от нуля, что свидетельствует об их априори негауссовском распределении вероятностей.

Таблица 1 – Числовые характеристики процесса многокомпонентного воздушного загрязнения

Компонент загрязнения	Числовые характеристики процесса				
	средне	Дисперсия, $\sigma^2$	СКО, $\sigma$	коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
Пыль	73,25	1808,528	42,5267	1,561582	2,930962
NO <sub>x</sub>	96,68525	726,4026	26,9518	0,384603	1,345558483
SO <sub>2</sub>	1230,80	389081,4	623,76389	0,164881	-0,919651
CO	122,6517	2140,277	46,26312	1,44879	5,733235
O <sub>2</sub>	5,6876	2,715175	1,6469	6,768785	54,687

**Выводы.** 1) Анализ реализаций процессов загрязнения показывает, что в них, наряду с одиночными экстремальными выбросами, присутствуют низкочастотные псевдогармонические составляющие. Последние могут считаться периодическими трендами со случайными амплитудами и фазами. Обобщенной моделью таких реализаций является случайный процесс с нестационарностью не только по математическому ожиданию, но и по спектру.

2) Анализ гистограмм, распределения значений процессов загрязнения, указывает на явное отличие законов распределения этих значений от закона Гаусса. Это отличие подтверждается и оценками числовых характеристик значений процессов загрязнения. Асимметрия их законов распределения характеризуется только положительными значениями. Коэффициенты асимметрии достаточно большие (от 1,5 до 6,7), коэффициенты эксцесса могут превышать значения от 5,7 до 54.

3) Априори негауссовские законы распределения реализаций процессов технологического загрязнения указывает на функциональную положительную зависимость дисперсии любого из процессов загрязнения от математического ожидания. Увеличение последнего (из-за нестационарности, например) повышает дисперсию процесса загрязнения, приводя к появлению локальных экстремальных выбросов.

**Список литературы:** 1. Росляков П.В. Контроль вредных выбросов в атмосферу / П.В.Росляков, И.Л. Ионкин, И.А. Закиров и др.; под ред П.В.Рослякова, М.: Изд. МЭИ, 2004.- 228 с. 2. Ионкин И.Л. Система непрерывного мониторинга и контроля вредных выбросов ТЭС в атмосферу / И. Л. Ионкин, П.В. Росляков, Л.Е.Егорова и др.: учебн. пособие. М.: Изд. МЭИ, 2000, - 158 с. 3. Любимова Н.А. Статистическая модель обнаружения нежелательных трендов контролируемых параметров газообразных выбросов энергетических предприятий / Н. А. Любимова // Электронное моделирование: К.: Выпуск №2. (V.36) - 2014

**Bibliography (transliterated):** 1. Rosljakov P.V., Ionkin I.L., Zakirov I.A. i dr.; pod red P.V.Rosljakova *Kontrol' vrednyh vybrosov v atmosferu*. Moscow: Moscow energetical institute, 2004. 2. Ionkin I.L. Rosljakov P.V. Egorova L.E. Sistema nepreryvnogo monitoringa i kontrolja vrednyh vybrosov TJeS v atmosferu. Moscow: Moscow energetical institute, 2000.. 3. Ljubimova N.A. *Statisticheskaja model' obnaruzhenija nezhelatel'nyh trendov kontroliruemnyh parametrov gazoobraznyh vybrosov jenergeticheskikh predpriyatij* Elektronnoe modelirovanie. No 2. 2014.

Поступила (received) 13.05.2014

**Ю. В. ВЛАДИМИРОВ**, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**Е. Э. ПИЛИПЕНКО**, магистрант, НТУ «ХПИ»

## РЕАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ УКРАИНЫ

В статье приведены исследования и дана реальная оценка возможностям ветроэнергетики Украины. Введены понятия теоретического и реального технического потенциала ветроэнергетики, а также коэффициента экономических возможностей. Показана карта средневзвешенных скоростей ветра по регионам Украины. Указаны фактические среднегодовые коэффициенты использования установленной мощности ветроэлектростанций разных регионов Украины. Посчитано возможное суммарное производство электроэнергии ВЭС Украины с учетом реального технического потенциала и коэффициента экономических возможностей.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ветроустановка, потенциал, выработка электроэнергии.

**Введение.** Начиная с первого мирового энергетического кризиса 1973 года, человечество постоянно находится в состоянии перманентного энергетического голода. Большинство стран мира, решая эту проблему, исходят из необходимости одновременного повышения энергоэффективности при производстве и потреблении энергии и поиска альтернативных источников энергии. Одним из таких источников и есть ветроэнергетика, которая получила широкое развитие, например в таких европейских странах как Германия и Дания. Украина пытается придерживаться мировых тенденций в энергетической отрасли. В частности, по оценкам специалистов Украина обладает достаточно мощными ресурсами ветровой энергии [1].

К сожалению, начало развития ветроэнергетики в Украине пошло по ложному пути: для ветровых электростанций (ВЭС) принимались к установке морально устаревшие маломощные ветроустановки (ВЭУ) единичной мощностью в 50, 100 и 250 кВт, преимущественно изготовленные по лицензиям американских фирм, хотя в тот период в Дании и Германии были разработаны и уже преимущественно изготавливались и устанавливались ВЭУ мегаваттного класса (1-5 МВт).

Как результат такого неправильного подхода к развитию ветроэнергетики страны, по обнародованному газетой Кабинета Министров Украины «Урядовий кур'єр» данным, за первые десять лет

© Ю. В. Владимиров, Е. Э. Пилипенко, 2014

ветроэнергетики Украины каждый кВт·ч выработанной на ВЭС электроэнергии обошелся Украине по 3 доллара США. Использование же установленной мощности ВЭС Украины при этом составляло только 5,6% за год.

За последнее время ситуация в ветроэнергетике Украины изменилась к лучшему, в частности, на Ботиевской ВЭС и Донузлавской ВЭС были установлены ВЭУ единичной мощностью, соответственно, 3,0 и 2,5 МВт.

На 31 декабря 2013 года суммарная установленная мощность ветроэнергетического сектора Украины составила 371,2 МВт. За 2013 год все ветростанции Украины выработали более 630 млн кВт·ч, что составило 0,33% от общего производства электроэнергии [2].

В настоящее время в средствах массовой информации Украины часто декларируется, что ветроэнергетика способна обеспечить до 30%, а то и до 100% необходимой стране электроэнергии. Однако так ли это?

**Цель исследования.** Авторы данной статьи поставили задачу оценить реальные возможности ветроэнергетики Украины, с учетом, в том числе, экономического фактора.

**Результаты исследования.** Для анализа перспектив развития ветроэнергетики Украины был проведен расчет теоретического технического потенциала ВЭС страны. Под данным потенциалом подразумевается теоретическая возможность установки на каждом свободном га площади страны ВЭУ мегаваттного класса с учетом средневзвешенной скорости ветра по регионам страны (см. рисунок) и среднегодового времени использования установленной мощности ВЭС.

Для определения теоретического потенциала ветроэнергетики расчет возможного увеличения установленной мощности ВЭС Украины проводился ориентируясь на установку современных ВЭУ типа Vestas V-112 мощностью 3 МВт, установленных, в частности, на Ботиевской ВЭС [2]. Для установки одного такого ветроагрегата необходимо около 1 га земельной площади.

Площадь, пригодная для строительства новых ВЭС, была вычислена по официальной информации Государственного комитета Украины по земельным ресурсам [3].

По отчетным данным действующих ВЭС [4] были определены фактические среднегодовые времена использования установленной мощности ВЭС (коэффициента использования установленной мощности) для каждого региона. Которые составили 0,234 для



регионов со средней скоростью ветра свыше 5,5 м/с, 0,187 для регионов со средней скоростью ветра 5,0 м/с и 0,152 для регионов со средней скоростью ветра 4,5 м/с. Для регионов же со скоростью менее 4,5 м/с при нынешнем уровне технологий в ветроэнергетике и существующих ВЭУ, по мнению авторов данной статьи, строительство мощных ВЭС в ближайшие десятилетия нецелесообразно, на данных территориях могут устанавливаться ВЭУ для автономного энергоснабжения (см. рис. 1).



Рис. 1 – Средневзвешенные скорости ветра по регионам Украины

Расчеты, проведенные с учетом указанных выше данных и допущений показали, что теоретически на территории Украины можно разместить еще 364 тыс. 452 ВЭУ мощностью по 3 МВт (в том числе по регионам: 55 тыс. 318 ВЭУ – со скоростью ветра свыше 5,5 м/с, 82 тыс. 643 ВЭУ – со скоростью ветра 5,0 м/с и 226 тыс. 491 ВЭУ со скоростью ветра 4,5 м/с), при этом теоретический технический потенциал выработки ими электроэнергии составляет около 1651 млрд. кВт·ч в год.

Если же предположить, что годовое использование установленной мощности всех ВЭС Украины будет равно задекларированной Ботиевской ВЭС цифре в 40% (чему авторы данной статьи не склонны

верить), то выработка электроэнергии ветроэнергетикой страны составила бы около 2683 млрд. кВт·ч в год.

Мировая практика внедрения ветроэнергетики и других источников возобновляемой энергии показывает, что реальный технический потенциал не превышает 10 % от теоретического. Для Украины это возможность производить дополнительно около 165 (268) млрд. кВт·ч в год.

Однако очевидно, что поскольку при определении технических потенциалов учитывались лишь технические возможности и не учитывались экономические факторы (т.е. возможности инвестирования в ветроэнергетику), то производство указанного выше объема электроэнергии нереально.

При строительстве больших ветропарков в Европе на 1 кВт установленной мощности затрачивается порядка одной тысячи долларов США инвестиций, при этом средний срок службы ВЭУ составляет 6-8 лет [5]. За последние же 2 года инвестиции в ветроэнергетику Украины составили порядка 21 млрд грн [6].

Рассматривая реальные возможности ветроэнергетики Украины необходимо реальный технический потенциал оценивать с учетом коэффициента экономических возможностей, который следует определять как отношение возможных инвестиций в ветроэнергетику за 5 лет с учетом срока службы ВЭУ к необходимым инвестициям на строительство ВЭС (ВЭУ), учтенным в реальном техническом потенциале. Данный коэффициент в настоящее время для Украины составляет величину всего 0,005.

С учетом коэффициента экономических возможностей суммарное производство электроэнергии ВЭС Украины (в том числе уже существующими, производство электроэнергии которыми в 2013 году составило 630 млн кВт·ч [4]) может составить 1,455 (1,971) млрд кВт·ч в год, что составит порядка 0,81% и 1,1%, соответственно, от выработки электроэнергии традиционной электроэнергетикой Украины.

**Выводы.** В ближайшее двадцатилетие ветроэнергетика Украины не сможет играть существенную роль на энергетическом рынке страны.

Только при существенном (многократном) увеличении инвестиций в ветроэнергетику возможно достижение выработки в 3-5% от суммарного производства электроэнергии в Украине.

**Список литературы:** 1. Мхитарян Н. М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников / Н. М. Мхитарян. – К. : Наукова Думка, 1999. – 320 с. 2. Офіційний веб-сайт Державної служби статистики України [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ukrstat.gov.ua>. – Дата обращения : 20 апреля 2014. 3. Региональный интернет-портал Запорожского региона Таврия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://zaptavriya.co.ua>. – Дата обращения : 18 апреля 2014. 4. Офіційний веб-сайт Державного агентства земельних ресурсів України [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://land.gov.ua>. – Дата обращения : 15 февраля 2014. 5. Официальный веб-сайт Украинской ветроэнергетической ассоциации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.uwea.com.ua>. – Дата обращения : 5 апреля 2014. 6. Альтернативная энергетика : кому и куда выгодно вкладывать деньги?. Ремажевская Л. – Дело, 14 апреля 2013. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://delo.ua>. – Дата обращения : 10 мая 2014.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mhitarjan N.M. *Energetika netraditcionih i vobnovljaemih istochnikov*. Kyev: Naukova Dumka. 1999. 2. Ofitcijnij veb-sajt Derzhavnoji sluzhbi statistiki Ukraini [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupa : <http://www.ukrstat.gov.ua>. – Data obrasheniya : 20 aprelja 2014. 3. Regionalnij internet-portal Zhaporozhskogo regiona Tavrija [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupa : <http://zaptavriya.co.ua>. – Data obrasheniya : 18 aprelja 2014. 4. Ofitcijnij veb-sajt Derzhavnogo agenstva zemelnih resursiv Ukraini [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupa : <http://land.gov.ua>. – Data obrasheniya : 15 fevralja 2014. 5. Ofitcijnij veb-sajt Ukrainskoi vetroenergeticheskoi assotciatii Ukraini [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupa : <http://www.uwea.com.ua>. – Data obrasheniya : 5 aprelja 2014. 6. Alternativnaja energetika: komu i kuda vigodno vkladivat# den#gi?. – Remazhevskaja L. – Delo, 14 aprelja 2013. – [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupa : <http://delo.ua>. – Data obrasheniya : 10 maja 2014.

*Поступила (received) 16.05.2014*

УДК 629.764.064.5

**В. В. ГАСАНОВА**, студент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

**Ю. Г. КАТОРГИНА**, аспирант, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

**Я. А. СТОЛЯРОВ**, аспирант, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

**Е. Г. ЧЕЧИНА**, студент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

### **АНАЛИЗ И ВЫБОР ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ДОЛГО ЖИВУЩИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Проведен анализ типов аккумуляторов, используемых в энергоустановках космических аппаратов. Сформулированы рекомендации касательно выбора электрохимической системы для космических аппаратов сроком службы более 10 лет. Проведен расчет стоимости системы энергоснабжения с использованием различных типов аккумуляторов. Показано, что наиболее оптимальным, с точки зрения стоимости запуска, типом аккумуляторов являются электрохимические системы на основе лития.

**Ключевые слова:** система энергоснабжения, аккумулятор, аккумуляторная батарея, космический аппарат, орбита.

**Введение.** Данная статья посвящена анализу и выбору электрохимических накопителей энергии для энергоустановок космических аппаратов.

В настоящее время невозможно представить жизнь современного человека без участия разнообразных космических аппаратов:

- цифровое спутниковое телевидение (Бадр-2, Бонум, Апстар, Тор-6, Интелсат 20 и др.);
- цифровое спутниковое радиовещание (Афрistar и др.);
- телефонная связь (Бадр-2, Иридиум 97, Апстар, Тор-6, Интелсат 20 и др.);
- навигационные системы (Компас М4, Navstar, Глонасс 746 и др.);

© В. В. Гасанова, Ю. Г. Каторгина, Я. А. Столяров, Е. Г. Чечина, 2014

- дистанционное зондирование и исследование поверхности Земли (Криосат-2, Канопус-В и др.);
  - военные спутники (АЕНФ, DSCS и др.);
  - навигационные системы (Компас М4, Navstar, Глонасс 746 и др.);
  - дистанционное зондирование и исследование поверхности Земли (Криосат-2, Канопус-В и др.);
  - военные спутники (АЕНФ, DSCS и др.).
- Большинство современных космических аппаратов, которые работают на высоких и геостационарных орбитах, имеют проектный ресурс от 10 до 18 лет (см. рис. 1).

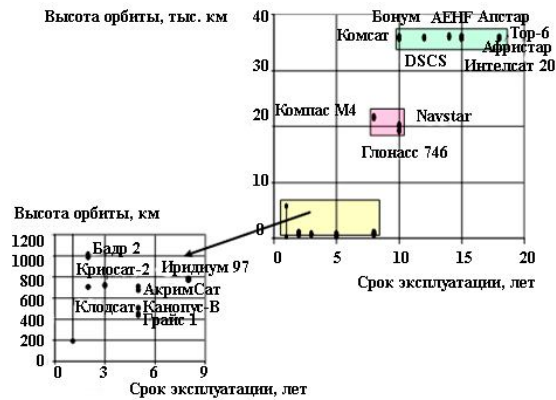


Рис. 1 - Ресурс различных космических аппаратов.

Система энергоснабжения космического аппарата предназначена для выработки, хранения, регулирования и распределения электроэнергии во всех фазах работы космического аппарата на орбите.

Система энергоснабжения космического аппарата состоит из следующих элементов:

- источники энергии;
- накопители энергии;
- преобразователи энергии;
- система управления и контроля.

Выход из строя системы энергоснабжения ведет к отказу всего космического аппарата. На данный момент, одними из наиболее критичных элементов энергоустановок космических аппаратов, с

точки зрения ресурса, являются накопители энергии, а именно аккумуляторные батареи. В зависимости от условий работы космического аппарата к электрохимическим аккумуляторам, входящим в состав энергоустановок, выдвигаются различные требования: возможность обеспечения большего количества циклов заряда-разряда, возможность обеспечения длительной сохранности энергии и т.п. Исходя из требований к аккумуляторам по количеству циклов и ресурсу в составе энергоустановок космических аппаратов применяются 3 типа электрохимических аккумуляторов: никель-кадмиевые; никель-водородные и литий-ионные.

**Постановка задачи.** Обзор источников информации [1-3, 6, 8-10] показал, что выполнение современных задач, решаемых космическими аппаратами, требует их длительной эксплуатации.

В зависимости от характеристик орбиты, на которой работает космический аппарат, электрохимические аккумуляторы, входящие в состав энергоустановок, работают в разных условиях: так при эксплуатации космических аппаратов на низких орбитах электрохимический аккумулятор за время эксплуатации подвергается значительно большему количеству циклов заряда-разряда (см. рис. 2, 3 и 4), чем при эксплуатации космических аппаратов на высоких орбитах.

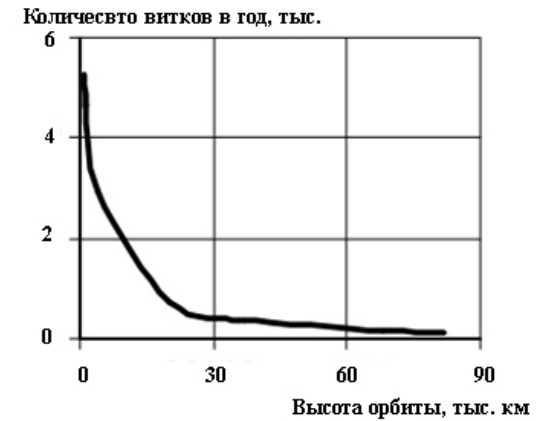


Рис. 2 - Изменение количества витков космического аппарата в год в зависимости от высоты орбиты.

В связи с тем, что аккумуляторные батареи являются составляющей частью энергоустановок основной массы ракетно-

космических объектов и в значительной степени влияют на их работоспособность и ресурс, вопрос о применении наиболее оптимального типа электрохимической системы является довольно актуальным.



Рис. 3 - Изменение количества витков космического аппарата в зависимости от его ресурса и высоты орбиты.

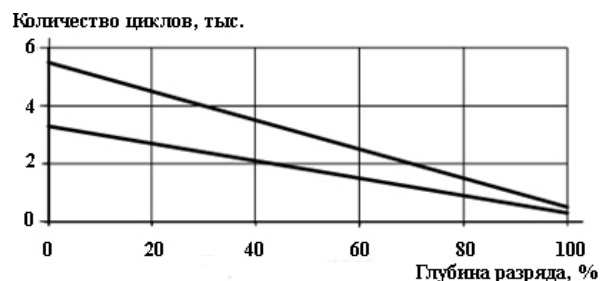


Рис. 4 - Изменение количества циклов заряда-разряда никель-кадмиевых аккумуляторов от глубины разряда

Выбор конкретного типа аккумуляторов для использования в системах энергоснабжения различных объектов определяется несколькими факторами:

- условиями работы в составе энергоустановки;

- режимом работы электрохимического аккумулятора в составе энергоустановки;
- временем функционирования;
- уровнем и видом циклограммы электропотребления;
- удельными характеристиками электрохимических аккумуляторов;
- стоимостью электрохимических аккумуляторов и энергоустановки в целом.

В данной статье нами рассматривается выбор электрохимического аккумулятора по критерию стоимости электрохимического аккумулятора и энергоустановки в целом. Остальные критерии выбора электрохимических аккумуляторов будут рассмотрены в других работах.

**Анализ типов аккумуляторных батарей, используемых в системах энергоснабжения космических аппаратов.** Современные аккумуляторы способны выдержать тысячи циклов заряда-разряда, что позволяет эксплуатировать их в течение десятков лет без замены [4, 5]. Для космических аппаратов, где обеспечение длительного ресурса и высокой надежности являются одним из основных требований, эта особенность весьма важна, и определяет широкое применение аккумуляторов различных электрохимических систем в энергоустановках космических аппаратов [7, 8].

Никель-кадмиевые аккумуляторы и батареи на их основе являются в настоящее время основным типом накопителей энергии, применяющимся в составе энергоустановок космических аппаратов. Никель-кадмиевые аккумуляторы используются чаще всего в составе энергоустановок космических аппаратов среднего ресурса (до нескольких лет), а также применяются в составе ракетных комплексов, где они находятся в дежурном режиме длительное время (до 20 лет с периодической заменой [7-10]).

Никель-водородные аккумуляторы были изобретены в СССР в начале 60-х годов, позднее началось их исследование в США и в других странах. Усилия разработчиков никель-водородных аккумуляторов направлены на достижение максимального срока службы, безопасности и значительной глубины разряда [7-10].

Литиевые аккумуляторы и батареи на их основе представляют собой широкий класс аккумуляторов с различными эксплуатационными характеристиками. Химические батареи на основе литиевых аккумуляторов считаются очень перспективными для использования в составе энергоустановок летательных аппаратов.

Однако их развитие все еще находится на ранних стадиях исследований и применения.

Анализ рынка аккумуляторов различных электрохимических систем показал, что на рынке электрохимических аккумуляторов представлен большой ряд как отечественных, так и зарубежных производителей, однако по удельным характеристикам не все из представленных аккумуляторов могут быть использованы в космической технике:

- литиевая электрохимическая система: A123 Systems (США), Altair Nanotechnologies (США), Samsung SDI (Республика Корея), Ener1 Battery Company (США), Dow Kokam (США), The Saft Group (Франция), BYD (Китай), Valence Technology (США), НПО ССК (Россия), АК Ригель (Россия), НИИХИТ-2 (Россия), ОАО НИИИ «Источник» (Россия), ОАО Энергия (Россия) и др.;

- никель-кадмиевая электрохимическая система: Shenzhen Suppower Tech. Co., Ltd. (Китай), SANYO Energy Corporation (Япония), Panasonic Corporation (Япония), Курский аккумуляторный завод (Россия), ЗАО «УкрБат» (Украина), ОАО «Завод автономных источников тока» (Россия), VARTA Consumer Batteries GmbH & Co. KGaA (Германия), GP Batteries Int. Ltd. (Республика Корея), Samsung SDI (Республика Корея), GAZ Geräte-und Akkumulatorenwerk Zwickau GmbH (Германия) и др.;

- никель-водородная электрохимическая система: Уральский электрохимический комбинат (Россия), ОАО «Сатурн» (Россия) и др.

Основные параметры электрохимических аккумуляторов, применяемых в составе энергоустановок космических аппаратов приведены в табл. 1.

**Критерии выбора электрохимических аккумуляторов для использования в составе системы энергоснабжения ракетно-космических объектов.** Для электрохимических аккумуляторов величиной, определяющей их массогабаритные характеристики, является плотность энергии. С этой точки зрения наиболее перспективными являются литий-ионные аккумуляторы. Однако при эксплуатации электрохимических аккумуляторов в составе энергоустановок ракетно-космических объектов ограничивающими факторами является также ресурс аккумулятора – возможность работы аккумулятора не только длительное время, но и возможность аккумулятора выдерживать большое количество циклов заряда-разряда. Для обеспечения длительного срока эксплуатации электрохимических аккумуляторов на борту ракетно-космических

объектов необходимо кроме проектных параметров аккумуляторов особое внимание уделить и эксплуатационным параметрам этих аккумуляторов (таблица 2), а также возможности применения конкретного типа аккумулятора на различных ракетно-космических объектах.

Таблица 1 – Сравнение основных характеристик электрохимических аккумуляторов, применяемых в космических аппаратах

Параметры	Ni-Cd	Ni-H <sub>2</sub>	Li-ion
Номинальное напряжение, В	1.2	1.5	3.6
Плотность энергии, Вт·ч/кг	30...40	50...90	90...120
Удельная мощность, Вт/кг	150	100	1800
Ресурс, полных циклов	1500	3000	800
Ресурс, при эксплуатации согласно инструкции, лет	7	10	18
Саморазряд в месяц, %	20	30	10
Нагрузочный ток:			
–пиковый	20С	20С	2С
–оптимальный	1С	1С	1С
Рабочая температура, °С	-20...60	-20...40	-20...60
Стоимость, \$/Вт·ч	7	8	5

Практика показывает, что ресурс электрохимических аккумуляторов определяется не только совершенством конструкции аккумулятора, но и условиями его эксплуатации, поскольку при проектировании энергоустановок, как правило, основное внимание уделяется выходным характеристикам, а не обеспечению оптимального режима эксплуатации аккумуляторов. В таких случаях проявляется снижение технического ресурса за счет ускорения процессов деградации аккумуляторов вследствие неблагоприятных условий эксплуатации, которые также необходимо учитывать.

Критерии истечения ресурса также определяются согласно режимам и условиям эксплуатации. Так при эксплуатации в дежурном режиме без подзаряда необходимо учитывать в первую очередь сохраняемость заряда. В большинстве случаев для определения факта истечения ресурса аккумуляторов достаточно оценки по величине разрядной емкости.

Достижение заданного ресурса космического аппарата осуществляется за счет увеличения емкости химических батарей, их



резервирования и применения новых типов аккумуляторов, что приводит к существенному удорожанию космического аппарата.

Таблица 2 – Особенности электрохимических аккумуляторов различных электрохимических систем, их достоинства и недостатки

	Ni-Cd	Ni-H <sub>2</sub>	Li-ion
Достоинства	<ul style="list-style-type: none"> <li>- накопленный большой опыт производства;</li> <li>- отработанность конструкции;</li> <li>- высокая надежность;</li> <li>- низкая стоимость;</li> <li>- высокая устойчивость к перегрузкам;</li> <li>- возможность восстановления.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- хорошие энергетические и емкостные показатели;</li> <li>- низкая удельная масса;</li> <li>- высокая продолжительность времени активной работы;</li> <li>- возможность обеспечения больших разрядных токов.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- высокое напряжение;</li> <li>- большая удельная емкость;</li> <li>- высокая плотность энергии;</li> <li>- относительно небольшой саморазряд;</li> <li>- низкая стоимость обслуживания;</li> <li>- отсутствие «эффекта памяти».</li> </ul>
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> <li>- небольшие значения удельных энергетических и емкостных показателей;</li> <li>- экологически загрязнен;</li> <li>- сложность в утилизации и переработке;</li> <li>- подверженность деградации;</li> <li>- небольшая допустимая глубина разряда;</li> <li>- наличие «эффекта памяти».</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- относительно большой удельный объем;</li> <li>- нетерпимость к перезаряду и переразряду.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- более высокая первоначальная стоимость;</li> <li>- малая тепловая стабильность;</li> <li>- необходимость применения встроенной схемы защиты;</li> <li>- подверженность старению;</li> <li>- затруднено быстрое тестирование.</li> </ul>

К энергетическим установкам для космических исследований предъявляется требование высокой удельной энергии, так как стоимость запуска в космос резко возрастает с увеличением массы. Например, уменьшение массы запускаемого аппарата на 200 кг приводит к экономии \$30 млн. Поэтому резервирование аккумуляторов в системах энергоснабжения значительно влияет на стоимость запуска

космического аппарата. Но не все аккумуляторы подвергаются резервированию. Например, литий-ионные аккумуляторы начинают деградировать уже с момента изготовления, поэтому ставить аккумуляторы такого типа на борт космического аппарата в виде резерва считается нецелесообразным. Такие батареи должны обладать сверхвысокой надежностью, в тоже время вес космического аппарата с литий-ионными батареями на борту будет значительно ниже. Замена никелевых аккумуляторов на литий-ионный позволяет снизить массу энергоустановки на 35-40%, сократить мощность зарядных устройств благодаря более высокой отдаче по энергии и уменьшить площадь радиатора для отвода тепла. В 2000 г. объем литий-ионных аккумуляторов, используемых в космической отрасли составлял 12 млн. шт.

При выборе электрохимических накопителей энергии для энергоустановок долгоживущих космических аппаратов нового поколения предлагается анализировать стоимость вывода аккумуляторов на заданную орбиту. Так, стоимость вывода 1 кг груза на низкую орбиту составляет \$20 тыс., на геостационарную орбиту до \$30 тыс.

**Выбор типа аккумуляторов для использования в составе системы энергоснабжения космических аппаратов с точки зрения их стоимости.** Вес аккумуляторной батареи может варьироваться в диапазоне от 6 до 80 кг в зависимости от типа, количества элементов, емкости. Для установленной емкости (380 А·ч) литий-ионная батарея будет весить приблизительно 25 кг, никель-кадмиевая – 150 кг, никель-водородная – 34 кг. Отсюда можно сделать вывод, что вес никель-водородной батареи превышает вес литий-ионной в 2 раза, при этом обеспечивая ту же емкость. Рассчитаем стоимость системы энергоснабжения в зависимости от различных типов аккумуляторных батарей.

Проведем расчет полной стоимости системы энергоснабжения с учетом стоимости аккумуляторных батарей по формуле (результаты приведены в табл. 3):

$$C_{\text{полн}} = \sum C_n + C_{\text{груза}} \cdot M_{\text{сп}},$$

где  $C_n$  – стоимость устройства преобразования мощности, системы управления потоком мощности, аккумулирующий элемент соответственно; а также следует учитывать стоимость удельных энергии и мощности и систему безопасности, особенно для химических накопителей энергии на основе литий-ионных элементов. Стоимость аккумуляторной батареи следует определять из учета

количества элементов, входящих в неё, а также брать во внимание резервирование;

$C_{\text{груза}}$  – стоимость груза;

$M_{\text{сп}}$  – масса системы, которая зависит от количества входящих в неё элементов.

Таблица 3 – Результаты расчета общей стоимости системы с различными типами аккумуляторных батарей

Тип аккумуляторной батареи	Масса аккумуляторной батареи (с учетом резервирования), кг	Стоимость 1 кг выводимого груза, тыс. \$ <sup>1</sup>	Стоимость аккумуляторной батареи, тыс. \$	Общая стоимость системы энергоснабжения, тыс. \$
Li-ion	25	15*25=375	1000	1375
Ni-H <sub>2</sub>	34, (2*34=68)	15*68=1020	500, (500*2=1000)	2020
Ni-Cd	150, (2*150=300)	15*300=4500	250, (2*250=500)	5000

<sup>1</sup> Стоимость 1 кг выводимого груза принимаем равной \$15000, при необходимости расчета для GEO орбит значение увеличивается в 2 раза

Окончательную стоимость системы энергоснабжения можно определить, если стоимость вывода 1 кг груза на орбиту (стоимость может изменяться в зависимости от типа орбиты) умножить на общую массу спутника (без учета системы энергоснабжения). Таким образом, сумма двух выше упомянутых составляющих даст стоимость системы энергоснабжения.

**Выводы.** В результате проведенного анализа современных, перспективных типов электрохимических аккумуляторов энергоустановок космических аппаратов сформулированы рекомендации касательно выбора электрохимической системы для космических аппаратов сроком службы более 10 лет. Анализ показал, что наиболее оптимальным типом с точки зрения стоимости системы энергоснабжения, являются электрохимические системы на основе лития, применение литий-ионных аккумуляторов является наиболее экономически выгодным вариантом за счет высокой надежности и относительно низкой стоимостью обслуживания. При этом литий-

ионные аккумуляторы обладают большой удельной емкостью, обеспечивая необходимый ресурс космических аппаратов.

**Список литературы:** 1. Mukund R. Patel, *Spacecraft power systems* / R. Patel Mukund – New York, Washington D.C.: CRC Press, Boca Raton. -2008. –734р. 2. Конохов С.Н. Научно-технические направления разработок космических аппаратов КБ "Южное" им. М. К. Янгеля/ С.Н. Конохов // Космічна наука і технологія. – 1995. - №1. - С. 12 – 34. 3. Ванке В.А. Космические энергосистемы / В.А. Ванке и др. М.: Машиностроение, 1990. – 144 с. 4. Давидов А.О. Анализ систем электроснабжения стартовых комплексов современных ракет-носителей / К.В. Безручко, А.О. Давидов, К.Н. Земляной, В.П. Фролов. // Вестник Двигателестроения. Научно-технический журнал.–Запорожье, 2008.- № 3 .- С.41-44. 5. Безручко К.В. Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии / К.В. Безручко, С.В. Губин, – Х.: ХАИ, 2007 –310с. 6. Нижниковский Е.А. Химические источники автономного электропитания радиоэлектронной аппаратуры / Е.А. Нижниковский. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 228 с. 7. Давидов А.О. Электрохимические аккумуляторы систем электроснабжения ракетно-космических летательных аппаратов / А.О. Давидов // Вісник Дніпропетровського Університету. Сер. Ракетно-космічна техніка / ДНУ. – Днепропетровск, 2008.– Вып 12 Т.2, №4.Т.16– С. 26-33. 8. Таганова А.А. Герметичные химические источники тока для портативной аппаратуры. Справочник / А.А. Таганова, И.А. Пак. – Санкт-Петербург: Химиздат., 2003 г. – 208 с. 9. Johnson P.J. Battery Performance Of The Skynet 4a Spacecraft. Final Report / P.J. Johnson, N.R. Francis – Hertfordshire, SG1 2AS: England Marta Marconi Space UK Ltd, 1999.–650р. 10. Кедринский И.А. Литиевые источники тока. / И.А. Кедринский, В.Е. Дмитренко, И.И. Грудянов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mukund R. Patel *Spacecraft power systems*. New York: Washington D.C.: CRC Press, Boca Raton.-2008. 2. Konjuhov S.N. Nauchno-tehnicheskie napravlenija razrabotok kosmicheskikh apparatov KB "Juzhnoe" im. M. K. Jangelja *Kosmichna nauka i tehnologija*. 1995. No 1. 12 – 34. Print 3. Vanke V.A. *Kosmicheskie jenergosistemy*. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 4. Davidov A.O. Bezruchko K.V Zemljanoj K.N. Frolov V.P. Analiz sistem jelektrosnabzhenija startovykh kompleksov sovremennykh raket-nositelej. *Vestnik Dvigatelistroenija. Nauchno-tehnicheskij zhurnal*. 2008. No 3. 41-44 Print. 5. Bezruchko K.V. Gubin S.V *Avtonomnye nazemnye jenergeticheskie ustanovki na vobnovljaemykh istochnikah jenerгии*. Harkov: HAI. 2007. 6. Nizhnikovskij E.A. *Himicheskie istochniki avtonomnogo jelektropitanija radiojelektroonnoj apparatury*. Moscow: Moscow energetical institute, 2004. 7. Davidov A.O. Jelektrohicheskie akumuljatory sistem jelektrosnabzhenija raketno-kosmicheskikh letatel'nyh apparatov. *Visnik Dnipropetrovs'kogo Universitetu. Ser. Raketno-kosmichna tehnika* / DNU. 2008 No 12 Vol.2, No 4. 26-33 Print 8. Taganova A.A. Pak I.A. *Germetichnye himicheskie istochniki toka dlja portativnoj apparatury. Spravochnik*. Sankt-Peterburg: Himizdat., 2003. 9. Johnson P.J. Francis N.R. *Battery Performance Of The Skynet 4a Spacecraft. Final Report*. Hertfordshire, SG1 2AS: England Marta Marconi Space UK Ltd, 1999. 10. Kedrinskij I.A., Kedrinskij I.A. Dmitrenko V.E., Grudjanov I.I. *Litievye istochniki toka*. Moscow: Jenergoatomizdat, 1992.

Надійшла (received) 24.03.2014

**А. Г. ГУРИН**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**Ю. Г. ГОНТАРЬ**, асп. НТУ «ХПИ»

### РАЗРУШЕНИЕ УВЛАЖНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ГРОВОЗЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса развития поверхностного разряда по сухой и увлажненной поверхности полимерной изоляции для системы электродов «игла-плоскость» при воздействии импульсов перенапряжения положительной полярности. Показано влияние увлажнения поверхности изоляции на зону разрушения поверхности, обострение фронта воздействующих импульсов напряжения в слое увлажнения, создание условий для роста водных дендритов в местах формирования поверхностного разряда.

**Ключевые слова:** поверхностный разряд, увлажненная поверхность, высоковольтные импульсы перенапряжений.

Расширение производства изоляционных конструкций с полимерной изоляцией и, в первую очередь, кабельной продукции, сопровождается интенсивным изучением процессов старения этого типа изоляции в процессе эксплуатации, физики возникновения водных и электрических триингов, влияния различных факторов на электрическую прочность поверхностного слоя [3]. Исследования группой ученых Томского политехнического института под названием «Закономерности пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульсного напряжения» [4, 5] показало, что разряд по поверхности полимерной изоляции разделок кабеля в местах соединения и концевых муфтах, сопровождается внедрением воды в толщу полимерной изоляции, способствуя образованию водных триингов и каналов с различной степенью зауглероживания и заполнения водой. Эти явления возможны также при нарушении адгезии между основной твердой изоляцией и полупроводящим слоем, которые окружают токоведущую жилу. Наличие воды на поверхности изоляции и в порах играет роль поверхностно-активной среды, т.к. при наложении электрического поля с высокой напряженностью поверхностное натяжение на границе «полиэтилен-вода» резко падает, и из-за резкого перепада диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{\text{воды}} = 80$ ,  $\epsilon_{\text{ПЭ}} = 2,1$ ) возникают силы, которые приводят к разрушению полимерной изоляции.

© А. Г. Гурин, Ю. Г. Гонтарь, 2014

Под действием этих сил в полимерах происходят процессы кавитационного типа, распространяющиеся как трещины от водяных включений. Вода проникает в образовавшуюся трещину и процесс продолжает развиваться дальше со скоростью, зависящей от многих физико-химических факторов.

Полученные экспериментальные данные по влиянию сильных электрических полей показывают, что в этих условиях возможно усиленное поглощение влаги полимерным материалом, увеличение диэлектрических потерь, увеличение площади разрушения поверхности диэлектрика [6].

В работе проводились исследования влияния расположения игольчатого электрода непосредственно на поверхности изоляции и расстояния 2 мм от поверхности, когда контакт с поверхностью происходил через слой воды. Амплитуда контролируемого импульса напряжения составляла до 4 кВ при подаче одиночных стандартных импульсов перенапряжения положительной полярности.

**Экспериментальная установка.** Принципиальная схема установки для формирования фронта импульса грозового перенапряжения показана на рис. 1.

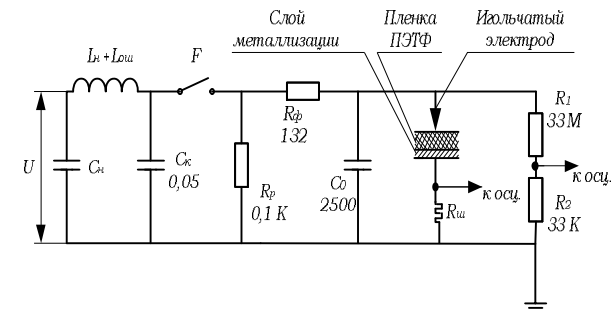


Рис. 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки:  
 $U$  – зарядное напряжение, кВ;  $C_n$  – накопительная емкость, Ф;  
 $L_n, L_{ош}$  – индуктивность  $C_n$  и ошиновки, Гн;  $R_p, R_f$  – разрядное и формирующее сопротивление;  $C_0$  – формирующая емкость;  
 $R_{ш}, R_1, R_2$  – сопротивление шунта и плеч делителя напряжения

Система испытательных электродов представляла собой игольчатый электрод, расположенный на поверхности металлизированной пленки ПЭТФ толщиной 10 мкм. Слой металлизации является вторым электродом. Толщина слоя металлизации до 8-10

мкм. Напряжение на разрядном промежутке регистрировалось с помощью омического делителя  $R_1, R_2$ , а ток омическим шунтом  $R_{ш}$ .

Слой металлизации при пробое пленки разрушался в месте пробоя. По площади слоя де металлизации электрода можно было судить об энергии импульса в местах пробоя, а также о направлении распространения импульса напряжения вдоль сухой и смоченной водой поверхности.

Схема позволяла формировать импульс напряжения, близкий к стандартному импульсу грозового перенапряжения. Фронт импульса формируется путем разряда емкости  $C_k$  на  $C_0$ , а спад импульса цепочкой  $C_n L_n$ . С целью увеличения напряжения сквозного пробоя пленки импульс напряжения имел положительную полярность.

При указанных параметрах схемы в соответствии с выводами в [7] форма импульса напряжения на объекте испытаний:

$$U_0 = U \frac{R_p C_k}{T_1 - T_2} \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (1)$$

а амплитуда импульса определяется как:

$$U_m = U \frac{R_p C_k}{T_1 - T_2} (1 - \alpha) \alpha^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}, \quad (2)$$

Где  $\alpha = \frac{T_2}{T_1}$ ;  $T_1 = R_p C_k = 5 \cdot 10^{-6}$  с;  $T_2 = R_{\phi} \frac{C_0 \cdot C_k}{C_0 + C_k} = 0,34 \cdot 10^{-6}$  с;

Время достижения максимального значения испытательного напряжения

$$\tau_m = \frac{T_1 T_2 \ln \frac{T_1}{T_2}}{T_1 - T_2} = 0,99 \cdot 10^{-6}, \text{ с} \quad (3)$$

**I вариант.** Острийный электрод расположен непосредственно на сухой поверхности диэлектрика. При приложении к промежутку импульса напряжения, близкого по форме и параметрам к индуктированному полному импульсу грозового перенапряжения, пробой или перекрытие происходит на фронте импульса [9].

Вероятность перекрытия и внедрение разряда в диэлектрик сравнимы между собой. Запоздывание одного и другого видов разряда, неоднородность электрического поля приводят к расширению зоны

ионизации и появлению пробоев на некотором расстоянии от места контакта острейного электрода.

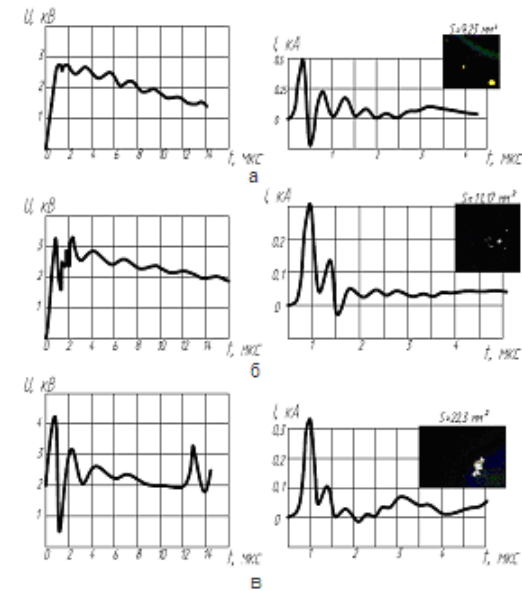


Рис. 2 – Форма импульсов напряжения и тока, приложенных к системе электродов «игла-плоскость» и вид деметаллизации плоского электрода: а – поверхность изоляционного слоя сухая; б – поверхность покрыта слоем воды; в – игольчатый электрод над смоченной изоляционной поверхностью, δ = 2 мм

Определить долю энергии импульса напряжения в основном и дополнительном канале пробоя можно исходя из объема зоны разрушения металлизации плоского электрода. Связь между энергией разрушения и энергией разрушения и энергией, подводимой к разрядному промежутку, можно представить как:

$$W = m(\alpha + \chi) = \gamma \cdot S \cdot \Delta_m \cdot (\alpha + \chi); \quad (4)$$

где  $W$  – энергия деметаллизации, Дж;

$m$  – масса вещества деметаллизации, кг;

$\alpha$  – удельная теплота плавления металла, Дж/кг;

$\chi$  – удельная теплота выпаривания, Дж/кг;

$\gamma$  – удельный вес материала металлизации, для алюминия  $2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь зоны деметаллизации,  $m^2$ ;

$\Delta_m$  – толщина слоя металлизации, м.

**II вариант.** Поверхность диэлектрика увлажнена слоем технической воды, острый электрод касается поверхности диэлектрика. В этом случае зона пробоев расширяется вокруг основного канала разряда (рис. 2б), что, видимо, связано с влиянием влаги на обострение импульса напряжения и дополнительным фактором усиления тангенциальной составляющей электрического поля и электростатических сил, способствующих внедрению разрядного тока в диэлектрик.

**III вариант** (рис. 2в) имитирует пробой диэлектрика в случае увлажненной поверхности, когда игольчатый электрод расположен на некотором расстоянии от нее. Это самый неблагоприятный случай, когда развитию разряда способствует наличие усиления поля в воздушном зазоре за счет обострения импульса напряжения, его пробой и дальнейший пробой увлажненного диэлектрика импульсом с круглым фронтом. При эксперименте воздушный зазор составлял до 2 мм.

Изменение количества энергии импульса при пробое для трех вариантов эксперимента приведены в таблице.

Таблица – Энергия пробоя разрядного промежутка при увлажненной поверхности диэлектрика

№ п/п	Тип разрядного промежутка	Площадь деметаллизации и электрода, $mm^2$	Масса металлического покрытия, разрушенного разрядом, кг	Энергия разрушения $W_p$ , Дж	Отношение энергии разрушения к запасенной энергии $W_p / W_{зап}$
1	Острие – диэлектрик – плоскость металлического электрода	9,23	$2,49 \cdot 10^{-7}$	2,81	0,2
2	Острие – слой воды – диэлектрик – плоскость электрода	11,17	$3,01 \cdot 10^{-7}$	3,4	0,25
3	Острие – воздушный промежуток – слой воды – диэлектрик – металлический слой плоского электрода	22,3	$6,01 \cdot 10^{-7}$	6,78	0,5

**Выводы:** 1. Наличие влаги и воздушных включений в зоне повышенной напряженности электрического поля приводит к увеличению доли энергии импульсов перенапряжения, расходуемой на разрушение зоны поверхностного слоя диэлектрика.

2. Присутствие влаги и воздушных включений способствует обострению воздействующих импульсов напряжения и созданию условий внедрения поверхностного разряда вглубь диэлектрика.

3. Воздушные или газовые включения между электродами способствуют усилению неравномерности электрического поля у острейшего электрода, ускоряя процесс ионизации и разрушения диэлектрика.

4. Предложенный метод определения энергии разрушения диэлектрика при пробое путем определения массы слоя металлизации электрода может быть использован для качественной оценки исследуемых процессов.

**Список литературы:** 1. Франц В. Пробой диэлектриков / В. Франц. – М.: Изд-во иностр. лит. – 1961. – 200 с. 2. Strigel R. Elektrische Stoßfestigkeit / R. Strigel. – Berlin: Springer. – 1955. – 280 p. 3. Шидловский А. К. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения / А. К. Шидловский, А. А. Щерба, В. М. Золотарев, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. – 2013. – 550 с. 4. Воробьев А.А., Воробьев П.А., Чепиков А.Т. Российская академия естественных наук. Научное открытие: Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения. Диплом № 107. – М.: 1999. – Регистрационный № 122. – Приоритет 14 декабря 1961 г. 5. Воробьев Г. А. Эффект внедрения разряда в твердый диэлектрик, погруженный в изолирующую жидкость – Г. А. Воробьев // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.75, вып. 4. – С. 125–127. 6. Белоусов Ф. А. Влияние электрического поля по диффузии воды в полимерной изоляции : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.09.02 «Электротехнические материалы и изделия» / Белоусов Федор Анатольевич ; Санкт-Петербургский гос. техн. ун-т. – Санкт-Петербург, 2000. 7. Бржезицкий В. О., Исакова А. В., Рудаков В. В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч посібник / За ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. – Харків: НТУ „ХПІ” – Торнадо, 2005. – 930 с. 8. Гурин А. Г. Разрушение поверхностного слоя диэлектрика в концевых кабельных муфтах под действием грозových перенапряжений / А. Г. Гурин, Ю. Г. Гонтарь // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Энергетика: надійність та енергоефективність №59 - Вестник НТУ "ХПИ", 2013. - ISSN 2224-034959 - Вестник НТУ "ХПИ", 2013. 9. Воробьев Г. А. Электрический пробой твердых диэлектриков / Г. А. Воробьев, С. Г. Еханин, Н. С. Несмелов // Физика твердого тела. – № 6. – 2005. – с. 1048–1052. 10. John Grainger, William Stevenson Jr. Power System Analysis. – McGraw-Hill Education (India), 2003. – 785 pp.

**Bibliography (transliterated):** 1. Franc V. Proboj dijelektrikov. Moscow: Izd-vo inostr. lit. 1961. 2. Strigel R. Elektrische Stoßfestigkeit. Berlin: Springer. – 1955. 3. Shidlovskij A. K. Shherba A. A. Zolotarev V. M. Podol'cev A. D., Kucherjavaja I. N. Kabeli s polimernoj izoljaciej na sverhvyssokie naprjazhenija, Kyev: In-t jelektrodinamiki NAN Ukrainy. 2013. 4.



Vorob'ev A.A., Vorob'ev P.A., Chepikov A.T. Rossijskaja akademija estestvennyh nauk. Nauchnoe otkrytie: Zakonomernost' probuja tverdogo dijelektrika na granice razdela s zhidkim dijelektrikom pri dejstvii impul'sa naprjazhenija. Diplom № 107. – М.: 1999. – Registracionnyj № 122. - Prioritet 14 dekabnja 1961 g. 5. Vorob'ev G. A. Jeffekt vnedrenija razrjada v tverdij dijelektrik, pogruzhennyj v izolirujushhuju zhidkost' *Pis'ma v ZhTF*. 2005. Vol.75, No. 4. 125–127. Print. 6. Belousov F. A. Vlijanie jelektricheskogo polja po diffuziju vody v polimernoj izoljacii : avtoref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk : spec. 05.09.02 «Jelektrotehicheskie materialy i izdelija» / Belousov Fedor Anatol'evich ; Sankt-Peterburgskij gos. tehn. un-t – Sankt-Peterburg, 2000. 7. Brzhezic'kij V. O., Isakova A. V., Rudakov V. V. *Tehnika i elektrofizika visokih naprug: Navch posibnik* Harkiv: NTU „HPI” – Tornado, 2005. 8. Gurin A. G. Gontar' Ju. G. Razrushenie poverhnostnogo sloja dijelektrika v koncevnyh kabel'nyh muftah pod dejstviem grozovyh perenaprjazhenij *Sbornik nauchnyh trudov "Vestnik NTU "HPI" : Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist'* No 59. 2013. 9. Vorob'ev G. A. Ehanin, S. G. Nesselov N. S. *Jelektricheskij probuj tverdijh dijelektrikov Fizika tverdogo tela*. No 6. 2005. 1048–1052. Print 10. John Grainger, William Stevenson Jr. *Power System Analysis*. McGraw-Hill Education (India), 2003.

*Надійшла (received) 24.03.2014*

УДК 551.594.221

**А.О. КУКСОВ**, бакалавр, НТУ «ХПИ»;  
**О.О. ПЕТКОВ**, докт. техн. наук, с.н.с., НТУ "ХПИ"

### **ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЛУЧЕННЯ РОЗРЯДУ ДОВГОЇ ІСКРИ В ТОЧКИ ПЛОЩИНИ В НЕОДНОРІДНОМУ ПОЛІ**

У статті запропонована двокрокова імітаційна модель влучення розряду довгої іскри в площину. Підтверджено адекватність розробленої моделі. Наведено результати чисельного імітаційного моделювання імовірнісного процесу влучення довгої іскри в площину. Здійснено порівняння результатів моделювання щільності розподілу точок ураження з даними експерименту.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, електричний розряд, щільність розподілу

**Постановка проблеми.** В результаті стрімкого розвитку електротехніки та електроенергетики, оснащення високочутливою електронікою різного обладнання та зростання його ціни все більш гостро постає питання надійності захисту встановленого обладнання від ураження блискавкою, яка являє собою багатоступінчатий розряд довгої іскри в атмосфері. Одним з аспектів забезпечення надійності роботи заглибленого обладнання, розташованого безпосередньо під поверхнею ґрунту (обладнання складів, комунікацій і т.п.), є вивчення закономірностей розподілу точок ураження фінальним розрядом блискавки. Для визначення розподілу ймовірностей влучення довгої іскри в площину в лабораторних умовах, необхідні значні витрати ресурсів. Останнім часом, з розвитком комп'ютерної техніки, все більше уваги приділяють розрахунковими моделями, які потребують менше часових і матеріальних ресурсів, а також дають можливість імітувати широкий діапазон зміни параметрів розряду довгої іскри.

**Аналіз публікацій.** Розробка моделей ураження об'єктів блискавкою, необхідна для дослідження надійності систем блискавкозахисту, але, в силу складності процесу, в теперішній час немає моделі, яка в повному об'ємі достовірно описувала б розподіл точок ураження площини довгою іскрою. Даному напрямку присвячена низка досліджень.

В [1] досліджувався розподіл точок ураження площини розрядом довгої іскри в розрядному проміжку довжиною 5 м.

© А. О. Кусков, О. О. Петков, 2014

Отримані результати були використані для вивчення захисних властивостей стрижневих блискавковідводів.

В роботі [2] наведено результати експериментальних даних по статистичному розподілу точок ураження заземленої площини в системі стрижень-площина у закритому приміщенні. При обробці даних була визначена кількість точок ураження для кожного з секторів досліджуваної зони площини. Експеримент проводився при позитивній полярності стрижня, максимальна напруга на виході ГІН не перевищує 800 кВ.

В [3] аналізуються експериментальні дані по ураженню заземленої площини та розташованих на ній об'єктів електричним розрядом з максимальним значенням напруги 1,2 МВ та довжиною розрядного проміжку – 3 м. Експерименти проводилися на відкритому просторі.

В [4] розглянуто статистичну модель розряду блискавки на об'єкт-стрижень, який розташований на нескінченному прямому провіднику. Модель має двоступінчатий характер. Показано залежність ймовірності ураження стрижня від величини півінтервалу горизонтального зміщення розряду. Моделювання проводилося при висоті початку руху розряду  $H = 10$  м та висоті об'єкта-стрижня  $h = 2$  м. Дана модель передбачає випадковість значень кута руху розряду та дає оцінку процесу ураження об'єкта-стрижня у вигляді ймовірності ураження.

Як показує проведений аналіз, останнім часом, значна частина досліджень в галузі блискавкозахисту направлена на формування набору експериментальних даних по ураженню довгою іскрою площини та розташованих на ній об'єктів. Отримані результати дозволяють удосконалити розроблені моделі ураження площини довгою іскрою та перевірити адекватність моделей експериментальним даним.

**Мета роботи.** Розробка двокрокової моделі влучення розряду довгої іскри в площину та імітаційне моделювання щільності розподілу точок ураження площини довгою іскрою.

**Результати дослідження.** Розглянемо двокрокову модель ураження площини  $Q$  розрядом довгої іскри. На першому кроці (дивись рисунок 1) розряд рухається прямолінійно з початкової точки  $m$  в напрямку, який визначається випадковими значеннями кутів  $\theta_1$  і  $\alpha_1$

Довжина розряду на першому кроці фіксована і менша довжини розрядного проміжку  $R_1 < H_1$ . Величина розрядного проміжку приймається постійною.

Випадкові кути мають рівномірний розподіл з такими щільностями:

$$f(\theta_1) = \begin{cases} \frac{1}{\theta_{1\max}}, & \text{при } \theta_1 \in [0; \theta_{1\max}), \\ 0, & \text{при } \theta_1 \notin [0; \theta_{1\max}). \end{cases} \quad (1)$$

$$f(\alpha_1) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & \text{при } \alpha_1 \in [0; 2\pi), \\ 0, & \text{при } \alpha_1 \notin [0; 2\pi). \end{cases} \quad (2)$$

Кінцева точка руху іскри на першому кроці  $T_1$  має проекцію  $O_1$  на площину  $Q$  з полярними координатами  $\varphi = \alpha_1$  та  $\rho = r_1$  в системі з віссю  $OX$ , і декартові координати в системі  $XYZ$ :  $X = x_1$ ,  $Y = y_1$ ,  $Z = 0$ . Як видно із рисунка 1,  $Z$ -координата кінцевої точки руху  $T_1$  дорівнює:  $z_1 = H_1 - Z_0$ , де  $Z_0$  – величина зміщення розряду на першому кроці вздовж осі  $OZ$ .

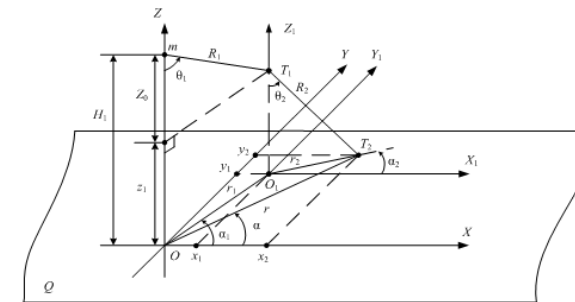


Рис. 1 – Ураження площини розрядом довгої іскри

На другому кроці розряд рухається також прямолінійно з точки  $T_1$  в напрямку, який визначається випадковими значеннями кутів  $\alpha_2$  та  $\theta_2$  до ураження площини  $Q$ . Випадкові кути мають рівномірний розподіл з такими щільностями:

$$f(\theta_2) = \begin{cases} \frac{1}{\theta_{2\max}}, & \text{при } \theta_2 \in [0; \theta_{2\max}), \\ 0, & \text{при } \theta_2 \notin [0; \theta_{2\max}). \end{cases} \quad (3)$$

$$f(\alpha_2) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & \text{при } \alpha_2 \in [0; 2\pi), \\ 0, & \text{при } \alpha_2 \notin [0; 2\pi). \end{cases} \quad (4)$$

Максимальні значення кутів  $\theta_{1\max}$  та  $\theta_{2\max}$  в (1) та (3) вибираються з інтервалу  $[0, \pi/2]$

Кінцева точка руху розряду на другому кроці  $T_2$  має полярні координати  $\varphi = \alpha_2$  та  $\rho = r_2$  в системі з віссю  $O_1X_1$ , і декартові координати в системі  $XYZ$ :  $X = x_2$ ,  $Y = y_2$ ,  $Z = 0$ .

З рисунка 1 висота  $z_1$  та полярний радіус  $r_1$  кінцевої точки першого кроку  $T_1$  визначаються за співвідношеннями (в системі координат  $XYZ$ ):

$$z_1 = H_1 - R_1 \cos(\theta_1), \quad (5)$$

$$r_1 = R_1 \sin(\theta_1), \quad (6)$$

Полярний радіус на другому кроці  $r_2$  з рисунка 1 визначається як (в системі координат  $X_1Y_1Z_1$ ):

$$r_2 = z_1 \operatorname{tg}(\theta_2), \quad (7)$$

Тоді, виходячи з того, що  $H_1$  і  $R_1$  фіксовані величини, а  $\theta_1$  випадкова величина розподілена за (1) та використовуючи методику наведену в [5], можемо визначити щільність розподілу  $z_1$  і  $r_1$ :

$$g(z_1) = \frac{1}{\theta_{1\max} \sqrt{R_1^2 - (H_1 - z_1)^2}}, \quad (8)$$

$$g(r_1) = \frac{1}{\theta_{1\max} \sqrt{R_1^2 - r_1^2}}, \quad (9)$$

Для цілей аналізу будемо рахувати, що на другому кроці висота  $z_1$  є фіксованою, а  $\theta_2$  випадкова величина розподілена за (3). Тоді, використовуючи методику з [5], знайдемо щільність розподілу  $r_2$  у вигляді:

$$g(r_2) = \frac{z_1}{\theta_{2\max} (z_1^2 + r_2^2)}, \quad (10)$$

Для проведення імітаційного моделювання ураження площини розрядом довгої іскри за двокроковою моделлю, була розроблена комп'ютерна програма в середовищі Excel з використанням Visual Basic for Application. Для тестування програми було проведено порівняння результатів розрахунку за аналітичними моделями з результатами імітаційного моделювання (показано на рис. 2 - рис. 4). З рис. 2 - рис. 4 видно, що результати розрахунків за аналітичними моделями (8), (9), (10), статистично співпадають з результатами чисельного імітаційного моделювання. Це дає підстави вважати, що розроблена програма адекватно описує імовірнісний характер зміни параметрів запропонованої моделі роздільно на кожному кроці.

Блок-схема програми наведена на рисунку 5. На початку роботи з програмою, користувач задає фіксовані величини та максимальні значення кутів  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ .

Після введення кількості імітувань розрядів, програма генерує значення випадкових величин та розраховує параметри розрядного проміжку  $z_1$   $r_1$   $r_2$ .

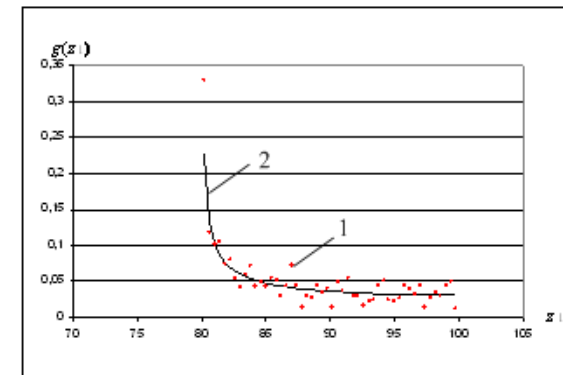


Рис. 2 – Графік щільності розподілу  $z_1$  при  $R_1 = 20$  м,  $H_1 = 100$  м при  $\theta_{1\max} = \frac{\pi}{2}$ : 1 – чисельне імітаційне моделювання; 2 – аналітична модель

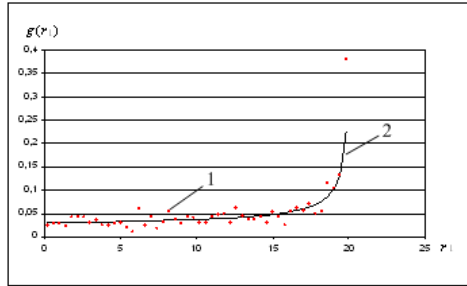


Рис. 3 – Графік щільності розподілу  $r_1$  при  $R_1 = 20$  м,  $H_1 = 100$  м при  $\theta_{1\max} = \frac{\pi}{2}$ : 1 – чисельне імітаційне моделювання; 2 – аналітична модель

На завершальному етапі формуються данні по ураженню ділянок площини та будується графік щільності розподілу точок ураження, а також розраховується середньоквадратичне відхилення (СКВ) отриманих розрахункових даних від експериментальних.

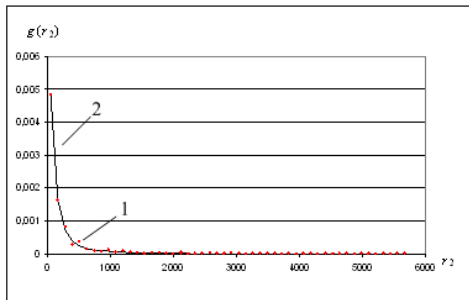


Рис. 4 – Графік щільності розподілу  $r_2$  при  $R_1 = 20$  м,  $H_1 = 100$  м при  $\theta_{1\max} = \frac{\pi}{2}$ : 1 – чисельне імітаційне моделювання; 2 – аналітична модель

В якості експериментальних даних були використані дані по ураженню площини розрядом довгої іскри, отримані на базі високовольтного електрофізичного стенду ГН-1,2 (НДПКІ «Молнія»). При обробці експериментальних даних, була визначена щільність розподілу точок ураження в залежності від полярного радіуса  $r$  [2].

З допомогою розробленої програми була проведена серія дослідів, з метою визначення параметрів моделі при яких спостерігається мінімальне СКВ даних чисельного імітаційного моделювання від даних експерименту. Графіки залежності СКВ від  $\theta_{1\max}$ ,  $\theta_{2\max}$  та  $R_1$  наведені на рисунку 6, 7 та 8. При обробці результатів було визначено,

що при  $R_1 = 0,8$  м,  $\theta_{1\max} = 10,6^\circ$ ,  $\theta_{2\max} = 20,4^\circ$  СКВ приймає мінімальне значення.

З рисунка 1 полярний радіус точки ураження площини  $T_2$  визначається як:

$$r = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, \quad (14)$$

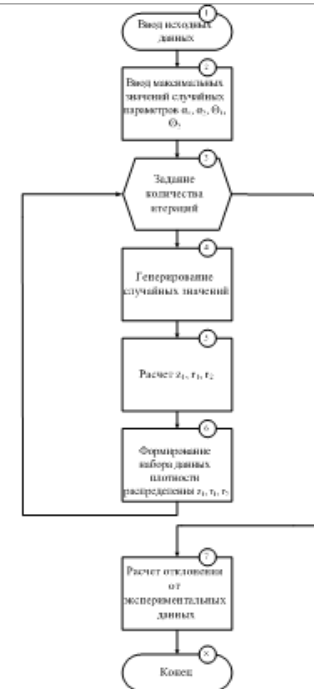


Рис. 5 – Блок - схема програми

На рисунку 9 показано порівняння щільність розподілу  $g(r)$ , визначених за результатами імітаційного моделювання та даними експерименту. З рисунка 9 видно, що графік, побудований за результатами імітаційного моделювання, має подібний характер до графіка за результатами експерименту. СКВ результатів імітаційного моделювання від експериментальних даних склало 15.

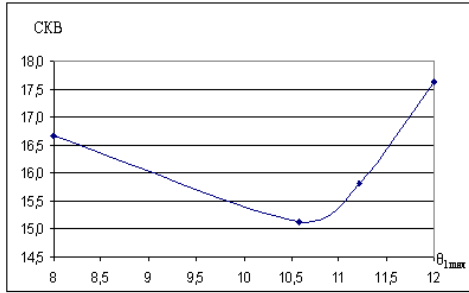


Рис. 6 – Залежність СКВ від  $\theta_{1max}$  при  $R_1 = 0,8$ ,  $\theta_{2max} = 20,4^\circ$

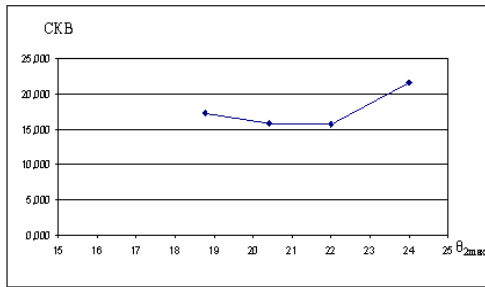


Рис. 7 – Залежність СКВ від  $\theta_{2max}$  при  $R_1 = 0,8$ ,  $\theta_{1max} = 10,6^\circ$

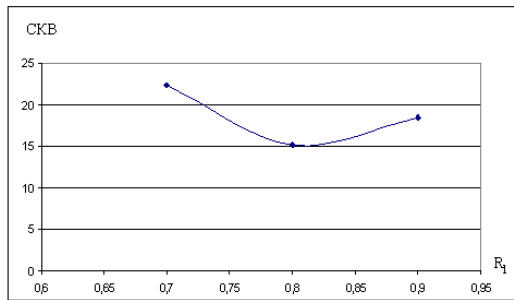


Рис. 8 – Залежність СКВ від  $R_1$  при  $\theta_{1max} = 10,6^\circ$ ,  $\theta_{2max} = 20,4^\circ$

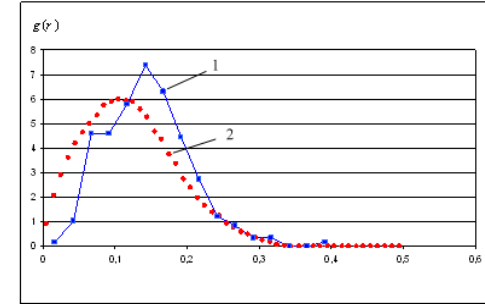


Рис. 9 – Графіки щільності розподілу  $r$ : 1 – за результатами експерименту; 2 – за результатами чисельного імітаційного моделювання

### Висновки:

1. Запропонована імітаційна двокрокова модель ураження площини розрядом довгої іскри.
2. Розроблена комп'ютерна програма для чисельного імітаційного моделювання.
3. Визначені параметри імітаційної моделі при яких середньоквадратичне відхилення даних чисельного імітаційного моделювання від даних експерименту мінімальне та не перевищує 15.

Матеріали статті будуть використані при подальшій розробці імітаційних моделей ураження довгою іскрою різних об'єктів.

**Список джерел інформації:** 1. Волкова О.В. Поражаемость искровым разрядом стержня на плоскости / О.В. Волкова, А.П. Корявин // Электричество. – 1991. – №5. – С. 52 – 55. 2. Колушко Г.М. Экспериментальное исследование поражения плоскости длинной искрой / Г.М. Колушко, П.Н. Мельников, О.С. Недзельский, А.А. Петков, С.С. Руденко, А.Ю. Чернухин // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – X. : НТУ "ХПІ". – 2012. – №21. – С. 146 – 153. 3. Баранов М.И. Экспериментальные исследования поражения заземленной плоскости и размещенных на ней объектов электрическим разрядом в длинном промежутке / М.И. Баранов, В.И. Доценко, В.М. Зиньковский, Г.М. Колушко, О.С. Недзельский, А.А. Петков, Е.Г. Понуждаева, С.С. Руденко, В.Л. Цехмистро // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – X. : НТУ "ХПІ". – 2013. – №27. – С. 11 – 20. 4. Колушко Д.Г. Статистическая модель поражения одиночного стержня разрядом молнии / Д.Г. Колушко, А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – X. : НТУ "ХПІ". – 2011. – №49. – С. 103 – 107. 5. Венцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Венцель. – М. : «Наука», 1969. – 576 с.



**Bibliography (transliterated):** 1. Volkova O.V. Korjavin A.R. Porazhaemost' iskrovym razrjadom sterzhnja na ploskosti. Jelektrichestvo. 1991. No 5. 52 – 55 Print. 2. Koliushko G.M. P.N. Mel'nikov, O.S. Nedzel'skij, A.A. Petkov, S.S. Rudenko, A.Ju. Jeksperimental'noe issledovanie porazhenija ploskosti dlinnoj iskroj *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "Harkivs'kij politehničnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematičnij vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug.* 2012. No 21. 146 – 153. Print 3. Baranov M.I. Docenko V.I., Zin'kovskij V.M., Koliushko G.M., Nedzel'skij O.S., Petkov A.A., Ponuzhdaeva E.G., Rudenko S.S., Cehmistro V.L. Jeksperimental'nye issledovanija porazhenija zazemlennoj ploskosti i razmeshennyh na nej ob'ektov jelektricheskim razrjadom v dlinnom promezhtutke. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "Harkivs'kij politehničnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematičnij vipusk: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug.* 2013. No 27. 11 – 20. Print 4. Koliushko D.G., Petkov A.A. Statisticheskaja model' porazhenija odinochnogo sterzhnja razrjadom molnii *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "Harkivs'kij politehničnij institut". Zbirnik naukovih prac'. Tematičnij vipusk: Tehnika i elektrofizika visokih naprug.* 2011. No 49. 103 – 107. Print 5. Ventcel' E.S. Teorija verojatnostej. Moscow : «Nauka», 1969.

*Надійшла (received) 05.02.2012*

УДК 621.311

**О.П. ЛАЗУРЕНКО**, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;  
**Г.І. ЧЕРКАШИНА**, ст. викл. НТУ «ХПІ»

## ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ВАРТОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

У роботі розглянутий механізм формування тарифу на електричну енергію для побутових споживачів, виявлені фактори, які безпосередньо впливають на розмір тарифу, наведені дані по споживанню електричної енергії мешканцями 9-типоверхового житлового будинку, визначено тариф на електричну енергію для споживачів 9-ти поверхового житлового будинку та обсяг дотацій.

**Ключові слова:** побутовий споживач електричної енергії, роздрібний тариф на електричну енергію, нормативні технологічні втрати, змінні розрахункові втрати, умовно постійні втрати.

**Вступ.** Тариф для побутових споживачів на електричну енергію (ЕЕ) є дотаційним та складає 0,2802 грн/кВт-год для помешкань, обладнаних газовими приладами, та 0,2154 грн/кВт-год – електричними плитами [1]. Суттєва невідповідність тарифу економічно обґрунтованому рівню призвела до його диференціації за обсягом споживання, а саме, за умови споживання електричної енергії більше 150 кВт-год/місяць тариф на ЕЕ складає 0,3648 грн/кВт-год, більше 800 кВт-год/місяць – 0,9576 грн/кВт-год. Для помешкань, обладнаних електричними плитами, місячне споживання ЕЕ більше 250 кВт-год – 0,2802 грн/кВт-год, більше 800 кВт-год/місяць – 0,9576 грн/кВт-год [1, 2].

Диференціація тарифу за обсягом споживання не вирішила питання відповідності останнього економічно обґрунтованому рівню і, як наслідок, на сьогодні знов піднімається питання збільшення тарифу на електричну енергію для населення.

Виходячи з вищенаведеного метою роботи є визначення реальної вартості ЕЕ для населення.

Для досягнення мети у роботі були вирішені наступні завдання:

- 1) Розглянутий механізм формування тарифу на ЕЕ для побутових споживачів
- 2) Виявлені фактори, які безпосередньо впливають на тариф;
- 3) Отримані дані по споживанню ЕЕ на вводі 9-ти поверхового житлового будинку;

© О.П. Лазуренко, Г.І. Черкашина, 2014

4) Визначено тариф на ЕЕ для споживачів 9-ти поверхового житлового будинку та обсяг дотацій.

**Формування тарифу на електричну енергію для побутових споживачів**

Згідно [3] роздрібний тариф на електричну енергію розраховується за такою формулою:

$$T_{ij} = \frac{(C_P^{C3})}{\prod_{j=1}^j (1 - \kappa_j)} + T_j^M + T_i^P \quad (1)$$

де  $i$  – група споживачів;  $j$  – клас напруги розподільчих мереж;  $C_P^{C3}$  – середня оптова ціна закупки електричної енергії з оптового ринку електричної енергії на розрахунковий місяць; за розрахунками НКРЕ питома вага оптової ціни в роздрібному тарифі електричної енергії складає 80 %;  $\kappa_j$  – економічні коефіцієнти нормативних технологічних втрат (ЕКНТВ) ЕЕ на її передачу через розподільчі мережі відповідного класу напруги;  $T_j^M$  – тариф на передачу електричної енергії розподільчими мережами  $j$  – го класу напруги;  $T_i^P$  – тариф на поставку електричної енергії  $i$ -му споживачу.

Тариф на передачу електричної енергії розподільчими мережами та тариф на поставку електричної енергії  $i$ -му споживачу визначаються НКРЕ та складають прибуток енергопостачальної компанії (обленерго).

ЕКНТВ ЕЕ на відповідних класах напруги ( $j$ ) відображають частку нормативних технологічних втрат електричної енергії ( $\sum AA_j$ ), що визначені за розрахунковий період на  $j$ -му класі напруги, у обсязі сальдованого надходження ЕЕ на  $j$ -му класі напруги ( $E_j^{(E)}$ )

$$K_j = \frac{\sum AA_j}{E_j^{(E)}} \quad (2)$$

Нормативні технологічні втрати складаються зі змінних розрахункових втрат електричної енергії в ЛЕП та трансформаторах;

умовно-постійних розрахункових втрат електричної енергії в трансформаторах та розрахункових втратах в інших елементах мереж[4].

Змінні розрахункові втрати ( $\Delta A_{3j}$ ) на  $j$ -му класі напруги залежать від характеристик режимів споживання електричної енергії, а саме від нерівномірності графіка навантаження, яка враховується дисперсійним коефіцієнтом збільшення втрат ЕЕ через нерівномірність графіка навантаження в елементах системи електропостачання ( $d_j$ ), несиметрії розподілу струмів по фазних дротах системи, яка враховується коефіцієнтом збільшення втрат через нерівномірність розподілу навантаження по фазах елементів системи ( $k_{Hj}$ ) на  $j$ -му класі напруги, а також від характеристик елементів системи електропостачання та характеристик навантаження (активне, реактивне):

$$\Delta A_{3j} = \frac{(R_{EЛj} + R_{ETj}) \cdot (A_j)^2 \cdot d_j \cdot k_{Hj}}{1,05 \cdot U_{Hj}^2 \cdot T_p} \cdot (1 + tg^2(\varphi_j)) \quad (3)$$

де  $T_p$  – кількість годин у розрахунковому періоді;  $R_{EЛj}, R_{ETj}$  – еквівалентний опір відповідно ЛЕП та трансформаторів  $j$ -го класу напруги;  $A_j$  – сумарне перетікання енергії по ЛЕП та трансформаторах  $j$ -го класу напруги;  $tg(\varphi_j)$  – коефіцієнт реактивної потужності;  $U_{Hj}$  – номінальна напруга  $j$ -го класу напруги.

Умовно постійні втрати в трансформаторах, а також інших елементах мережі залежать від характеристик цих елементів та відображають втрати неробочого ходу. Умовно постійні втрати в трансформаторах:

$$\sum_{j=6/0,38}^{110/6} \Delta A_{TPMnj} = T_p \cdot \sum_{j=1}^{n_{ГР0,38}} \Delta P_{HXj} + T_p \cdot \left( \sum_{s=1}^{n_{ГР0,38}} \Delta P_{HX0,38s}^{Y/Y} \right) \cdot k_{HTY/Y} \quad (4)$$

де  $\Delta P_{HXj}$  – сумарні значення втрат потужності н.х. груп трансформаторів  $i$ -го ступеня напруги з однаковим поєднанням номінальних напруг обмоток та номінальними напругами обмоток нижчої напруги 6(3) кВ і вище;  $n_{ГР0,38}$  – кількість груп трансформаторів  $i$ -го ступеня напруги з однаковим поєднанням номінальних напруг обмоток та номінальними напругами нижчої напруги 0,38 кВ і схемою зєднань обмоток «зірка-зірка з нульовим виводом»;  $\Delta P_{HX0,38s}^{Y/Y}$  – сумарне

значення втрат потужності н.х. в трансформаторах і-го ступеня напруги з номінальними напругами обмоток нижчої напруги 0,38 кВ і схемою зеднань обмоток «зірка-зірка з нульовим виводом»;  $k_{HTT/Y}$  – коефіцієнт збільшення втрат в трансформаторах через нерівномірність розподілу навантаження по фазах трансформаторів з схемою зеднань обмоток «зірка-зірка з нульовим виводом»

**Об'єкт дослідження.** У якості об'єкту дослідження був розглянутий 9-ти поверховий житловий будинок на 90 квартир, що знаходиться у м. Харкові, обладнаний газовими плитами. Будинок отримує живлення від двох трансформаторної понижувальної підстанції (ТП) 6/0,4 кВ. На підстанції встановлені трансформатори ТМ 400/6 та ТМ 320/6. Будинок – єдине навантаження ТП. Для спрощення розрахунків приймаємо, що у свою чергу ТП 6/0,4 кВ є єдиним споживачем ТП 35/6 кВ.

Відстань між ТП 35/6 і ТП 6/0,4 кВ та між ТП 6/0,4 кВ та щитом розподілення будинку складає відповідно 1500 м та 120 м. Лінії електропередач виконані алюмінієвими проводами перерізів 157,7 мм<sup>2</sup> та 50 мм<sup>2</sup>. Сумарне споживання електричної енергії за добу складає 524,17 кВт·год.

Типові графіки будинку наведено на рис. 1.

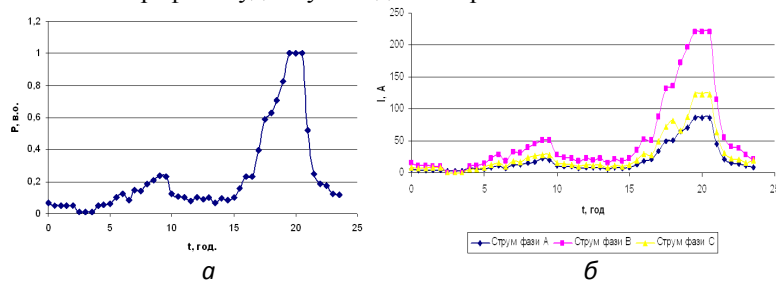


Рис. 1 – Типові графіки 9-ти поверхового будинку: а - навантаження; б - струм

**Визначення тарифу на електричну енергію для об'єкту дослідження.** Коефіцієнт збільшення втрат через нерівномірність розподілу навантаження по фазах ЛЕП 0,38 кВ складає 1,4037.

Коефіцієнт збільшення втрат електричної енергії через нерівномірність графіка навантаження обчислюємо за наступним виразом:

$$d = \left[ 1 + \frac{(P_{\max} - \bar{P})^2 \cdot (\bar{P} - P_{\min})}{2 \cdot \bar{P}^2 [2 \cdot (P_{\max} - \bar{P}) + (\bar{P} - P_{\min})]} \right] = 1,6916 \quad (5)$$

де  $P_{\max}$ ,  $\bar{P}$ ,  $P_{\min}$  – відповідно максимальне, середнє та мінімальне навантаження за розрахунковий період.

Згідно формули (3) обчислимо змінні розрахункові втрати електричної енергії в елементах системи електропостачання на рівні напруги 0,38.

$$\Delta A_{30,38} = \frac{0,2352 \cdot (524,17)^2 \cdot 1,4037 \cdot 1,69}{1,05 \cdot (0,38)^2 \cdot 24} (1 + (0,62)^2) = 58,32 \text{ кВт·год}$$

Умовно-постійні розрахункові втрати:

$$\sum_{j=6/0,38}^{6/0,38} \Delta A_{TPPMij} = 67,2 \text{ кВт·год}$$

Нормативні технологічні втрати електричної енергії на 2 класі напруги:

$$\Delta A_{HTBE2} = 125,52 \text{ кВт·год}$$

ЕКНТВ ЕЕ 2 класу напруги визначаємо за формулою (2):

$$k_2 = 0,24$$

Значення поточного тарифу обчислюємо за формулою (1). На лютий 2014 року  $C_P^{C3} = 803,42 \text{ грн/МВт·год}$  [6];  $k_1 = 6,46\%$  [7];  $T_1^M = 15,84 \text{ грн/МВт·год}$ ,  $T_2^M = 118,09 \text{ грн/МВт·год}$ ,  $T_1^P = 7,3 \text{ грн/МВт·год}$ ,  $T_2^P = 36,51 \text{ грн/МВт·год}$  [8].

Тариф складає  $T_{ij} = 1,2847 \text{ грн/кВт·год}$ . З урахуванням податку на додану вартість 1,54164 грн/кВт·год.

Об'єм дотацій ( $D$ ) визначаємо як різницю між вартістю ЕЕ за діючим тарифом ( $B_o$ ) та реальним обчисленим ( $B_p$ ).

$$B_o = 0,3648 \cdot 524,17 = 191,217 \text{ грн.}$$

$$B_p = 1,54164 \cdot 524,17 = 808,081 \text{ грн}$$

$$D = 616,864 \text{ грн}$$

**Висновок.** Таким чином, з проведених розрахунків можна зробити наступні висновки:

1) Діючий тариф на ЕЕ для побутових споживачів занижений більш ніж в 4 рази порівняно з економічно обґрунтованим;

2) Диференціювати тариф на ЕЕ необхідно не за об'ємом її споживання, а за режимами споживання ЕЕ кінцевим споживачем (рівномірність споживання на протязі доби та симетричність споживання).

**Список літератури:** 1. *Електронний ресурс* <http://www.oblenergo.kharkov.ua>; 2. *Постанова НКРЕ* від 23.04.2012 № 497 «Про встановлення тарифів на електроенергію, що відпускається населенню»; 3. *Постанова КМУ* від 01.06.2011 №869 «Про забезпечення єдиного підходу до формування тарифів на житлово-комунальні послуги»; 4. *Методика* складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38-150 кВ, аналіз його складових і нормування технологічних витрат електроенергії; 5. *Постанова НКРЕ* від 15.08.2013 №1110 «Про затвердження Положення про порядок подання, визначення та затвердження економічних коефіцієнтів нормативних технологічних витрат електроенергії»; 6. *Постанова НКРЕ* від 25.01.2014 №49; 7. *Постанова НКРЕ* від 13.06.2013 №686; 8. *Постанова НКРЕ* від 19.12.2013 №1653.

**Bibliography (transliterated):** 1. Elektronnyj resurs <http://www.oblenergo.kharkov.ua>; 2. Postanova NKRE vid 23.04.2012 № 497 «Pro vstanovlennya tary'fiv na elektroenergiyu, shho vidpuskayet'sya naseleennyu»; 3. Postanova KМУ vid 01.06.2011 №869 «Pro zabezpechennya yedy'nogo pidkhodu do formuvannya tary'fiv na zhy'tlovo-komunal'ni poslugy»; 4. Metody'ka skladannya struktury' balansu elektroenergiyi v elektry'chny'x merezhax 0,38-150 kV, analiz jogo skladovy'x i normuvannya tehnologichny'x vy'trat elektroenergiyi; 5. Postanova NKRE vid 15.08.2013 №1110 «Pro zatverdzhennya Polozhennya pro porjadok podannya, vy'znachennya ta zatverdzhennya ekonomichny'x koeficientiv normaty'vny'x tehnologichny'x vy'trat elektroenergiyi»; 6. Postanova NKRE vid 25.01.2014 №49; 7. Postanova NKRE vid 13.06.2013 №686; 8. Postanova NKRE vid 19.12.2013 №1653.

*Надійшла (received) 16.05.2014*

УДК 621.625.032

**Г.И. МЕЛЬНИКОВ**, канд. тех. наук. доц. НТУ «ХПИ»;  
**А.О. КОРОТКОВ**, асп. НТУ «ХПИ»;

## **СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

В данной работе детально рассмотрена проблема повышения энергоэффективности работа энергосберегающих электромеханических стендов для испытаний двигателей внутреннего сгорания. Рассматриваются методы повышения энергоэффективности работа испытательных стендов. Описан метод модернизации испытательных стендов. Рассмотрены принципиальные схемы этих модифицированных испытательных стендов. Детально описан принцип работы модифицированных испытательных стендов. Приведены положительные и отрицательные стороны модификаций испытательных стендов. Обоснована задача создания математических моделей испытательных стендов для дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** двигатели внутреннего сгорания, испытательные стенды, частотный преобразователь, генератор с постоянным магнитом, асинхронный генератор, машина постоянного тока, асинхронизированный синхронный генератор.

**Введение.** При производстве и ремонте двигателей внутреннего сгорания большое количество топлива расходуется на проведение работ по регулировке, испытанию, проверке эксплуатационных характеристик двигателей. В течение продолжительного периода энергию, производимую двигателями внутреннего сгорания во время подобных испытаний, практически не использовали. Для повышения эффективности использования топлива можно использовать различное оборудование, позволяющее генерировать энергию в электрическую сеть при испытаниях двигателей внутреннего сгорания.

**Цель статьи.** Рассмотреть, проанализировать и сравнить различные варианты построения испытательных стендов.

**Основные материалы исследования.** Современные испытательные стенды должны удовлетворять требованиям регламента испытаний, управляемости и энергосбережения.[1] Стенд должен обеспечивать два режима работы: холодную и горячую обкатку. В режиме холодной обкатки коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания раскручивают с помощью электрической машины, это нужно для притирки всех движущихся деталей двигателя. В режиме горячей обкатки, подключённая к коленчатому валу электрическая машина,

© Г. И. Мельников, А. О. Коротков, 2014

работает как электротормоз, создающий тормозной момент на валу двигателя внутреннего сгорания [1].

Для обеспечения энергосбережения испытательный стенд должен обладать возможностью генерации электрической энергии. Анализируя ряд стендов, представим те, которые наиболее полно удовлетворяют заданным требованиям.

**Испытательный стенд на базе машины постоянного тока с электромашинным преобразователем.** Нагружающий стенд с рекуперацией энергии можно создать на базе электромашинного преобразователя (ЭМП), подключенного к одной или нескольким установкам через специальную сеть постоянного тока см. рис. 1.

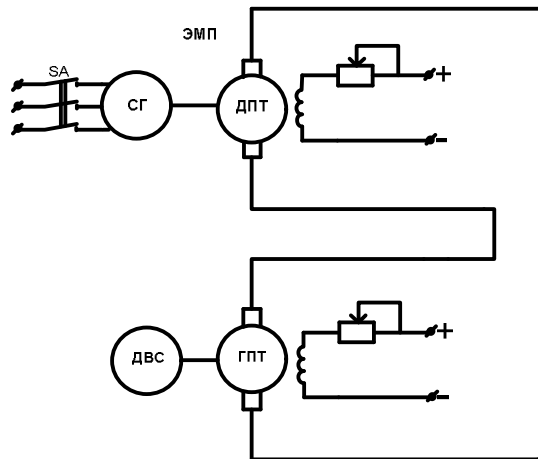


Рис 1 – Схема подключения тормозных стендов к электромашинному преобразователю.

Такая установка состоит из электромашинного преобразователя, соединенного через контактор SA с промышленной сетью трехфазного тока стабильной частоты. Испытательный стенд подключен к ЭМП через соединительную линию постоянного тока.

ЭМП состоит из синхронной машины и машины постоянного тока с независимым возбуждением. Он предназначен для преобразования постоянного тока, вырабатываемого тормозным устройством, в переменный ток промышленной частоты. Такой стенд обеспечивает холодную и горячую обкатку ДВС. Причём при горячей обкатке

обеспечивается генерация вырабатываемой ДВС энергии в сеть промышленного предприятия.

В тоже время такой стенд обладает рядом недостатков таких как:

- необходимость эксплуатации и обслуживания ЭМП и приводных машин постоянного тока.
- низкий КПД такой установки.
- низкая надёжность испытательного стенда.

**Испытательный стенд на базе машины постоянного тока.** При построении испытательного стенда на базе машины постоянного тока (МПТ), изображенной на рис. 2, необходимо решить такие проблемы как: передача энергии при разных частотах вращения испытуемого ДВС и преобразование вырабатываемого МПТ постоянного тока в переменный ток промышленной частоты. Один из способов решения этой проблемы это использование управляемого инверторного преобразователя (УИП) [2].

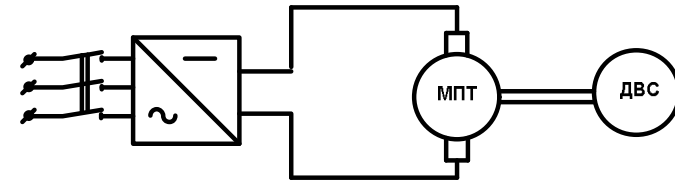


Рис. 2 – Схема испытательного стенда, построенного на базе машины постоянного тока с управляемым инверторным преобразователем

УИП обеспечивает преобразование постоянного тока вырабатываемого МПТ в переменный ток промышленной частоты. Такой преобразователь также обеспечивает регулирование стабилизирующих технических и технологических параметров работы стенда при холодной и горячей обкатке. Причём при горячей обкатке обеспечивается генерация вырабатываемой ДВС энергии в сеть промышленного предприятия. В тоже время такой стенд обладает рядом недостатков таких как:

- эксплуатация машины постоянного тока.
- высокая стоимость и мощность УИП.
- низкий КПД при низкой частоте вращения вала испытываемого ДВС.



**Испытательный стенд на базе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором.** При построении испытательного стенда на базе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором (АГКЗ), изображенного на рис. 3, возникает проблема передачи электрической энергии от АГКЗ в сеть предприятия, так как в процессе испытания ДВС может работать с разной частотой вращения. Для решения этой проблемы необходимо использовать управляемый частотный преобразователь (УЧП), в качестве которого используется транзисторный преобразователь [2].

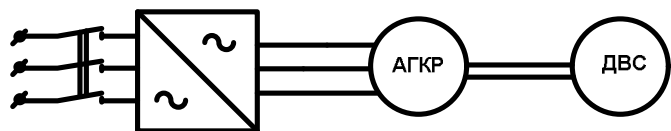


Рис. 3 – Схема испытательного стенда построенного на базе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором и управляемым частотным преобразователем.

УЧП обеспечивает преобразование переменного тока нестабильной частоты вырабатываемой АГКЗ в переменный ток промышленной частоты. Такой преобразователь обеспечивает регулирование стабилизирующих технических и технологических параметров работы стенда при холодной и горячей обкатке. Причём при горячей обкатке обеспечивается генерацию вырабатываемой ДВС энергии в сеть промышленного предприятия. В то же время такой стенд обладает рядом недостатков таких как:

- низкий КПД при низкой частоте вращения вала испытуемого ДВС.
- нестабильность выработки энергии при низкой частоте вращения вала испытуемого ДВС.
- высокая стоимость и мощность УЧП.

**Испытательный стенд на базе машин двойного питания.** При построении испытательного стенда на базе машины двойного питания целесообразно использовать асинхронный генератор с фазным ротором (АГФР) или асинхронизированный синхронный генератор (АСГ) изображенный на рис. 4. Но при работе этих машин возникает проблема с поддержанием заданной частоты тока возбуждения для поддержания заданных параметров на шинах генератора при нестабильной частоте вращения ротора генератора. Для решения этой проблемы необходимо использовать управляемый частотный

преобразователь (УЧП), подключённый к обмоткам ротора АГФР или к обмоткам возбуждения АСГ по схеме асинхронного вентильного каскада [3].

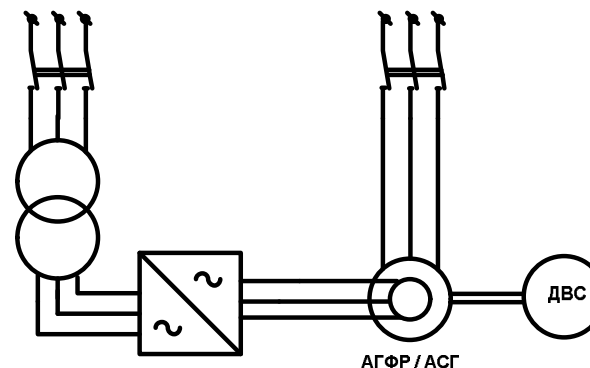


Рис. 4 – Схема испытательного стенда, построенного на базе асинхронного генератора с фазным ротором или асинхронизированного синхронного генератора.

УЧП обеспечивает питание обмоток ротора АГФР или обмоток возбуждения АСГ переменным током заданной частоты, что приводит к созданию переменного магнитного поля, которое наводит в обмотках статора ЭДС требуемой частоты. Такой преобразователь также обеспечивает регулирование стабилизирующих технических и технологических параметров работы стенда при холодной и горячей обкатке. Причём при горячей обкатке обеспечивается генерацию вырабатываемой ДВС энергии в сеть промышленного предприятия. В то же время такой стенд обладает рядом недостатков таких как:

- высокая стоимость АГФР и АСГ.
- низкий КПД УЧП при высокой частоте вращения вала испытуемого ДВС
- высокая потребляемая мощность УЧП при высокой частоте вращения вала испытуемого ДВС

**Испытательный стенд на базе генератора с постоянными магнитами.** При построении испытательного стенда на базе генератора с постоянными магнитами (ГПМ) изображенного на рис 5, возникают такие проблемы как: передачи энергии при разных частотах вращения испытуемого ДВС и преобразование вырабатываемого ГПМ постоянного тока в переменный ток стабильной частоты. Для решения

этой проблемы необходимо использовать управляемый инверторный преобразователем (УИП) в качестве, которого используется транзисторный преобразователь [3].

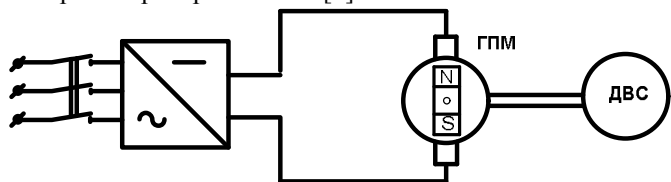


Рис. 5 – Схема испытательного стенда построенного на базе генератора с постоянными магнитами.

УИП обеспечивает преобразование постоянного тока, вырабатываемого ГПМ, в переменный ток промышленной частоты. Такой преобразователь также обеспечивает регулирование стабилизирующих технических и технологических параметров работы стенда при холодной и горячей обкатке. Причём при горячей обкатке обеспечивается генерация вырабатываемой ДВС энергии в сеть промышленного предприятия. Подобные стенды обладает рядом недостатков, таких как:

- высокая стоимость ГПМ.
- высокая стоимость и мощность УИП.
- низкий КПД установки при низкой частоте вращения вала испытуемого ДВС

**Вывод.** Представленные выше стенды имеют как свои преимущества, так и недостатки. Основным преимуществом всех испытательных стендов является возможность передачи выработанной ДВС энергии в промышленную сеть предприятия, что в свою очередь, позволяет экономить часть средств, затраченных на испытания. Также к преимуществам можно добавить тот факт, что все испытательные стенды обладают возможностью регулировки баланса реактивной мощности, что положительно влияет на систему электроснабжения предприятия.

Для выбора наилучшего способа построения испытательного стенда необходимо провести исследования, целью которых будет определение технических и эксплуатационных характеристик стендов различного типа. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Построение математических моделей всех испытательных стендов.

2. Определение энергоэффективности стендов в различных режимах работы.

3. Оценка надёжности и определение диапазона рабочих параметров различных стендов.

**Список литературы:** 1. Райков И.Я., Испытания двигателей внутреннего сгорания. И.Я. Райков. - Москва «Высшая школа» 1975 г. С 3-11 2. Тодарев В.В., Погуляев М.Н., Дорошенко И.В., Энергосберегающие электромеханические стенды для испытания двигателей внутреннего сгорания и трансмиссий сельскохозяйственной техники. / В.В. Тодарев, М.Н. Погуляев, И.В. Дорошенко // Вестник Гомельского гос. техн. университета им П.О. Сухого. -2007. -№4. – С.80-84. 3. Хватов С.В., Асинхронно-вентильные нагружающие устройства. / С.В. Хватов, В.Г. Титов. – Москва. «Энергоатомиздат», 1986 г. -144с

**Bibliography (transliterated):** 1. Rajkov I.Ja. *Ispytanija dvigatelej vnutrennego sgoranija*. Moskva «Vysshaja shkola» 1975. 2. Todarev V.V., Poguljaev M.N., Doroshenko I.V., *Jenergoberegajushhie jelektromehaniicheskie stendy dlja ispytanija dvigatelej vnutrennego sgoranija i transmissij sel'skohozjajstvennoj tehniky*. *Vestnik Gomeľ'skogo gos. tehn. universiteta im P.O. Suhogo*. 2007. No 4. 80-84 Print. 3. Hvatov S.V., Titov V.G. *Asinhronno-ventil'nye nagruzhajushhie ustrojstva*. Moskva. Energoatomizdat 1986.

Надійшла (received) 10.11.2013

**П. Е. ПОНОМАРЕВ**, канд. техн. наук, НИИВН, Славянск;  
**А. П. ПОНОМАРЕВА**, студентка НТУ «ХПИ»

### ВЛИЯНИЕ ГИДРОФОБИЗАЦИИ ИЗОЛЯТОРОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ИХ ПОВЕРХНОСТИ

Гидрофобные покрытия как одно из средств защиты наружной изоляции от перекрытий при загрязнении стали применять еще в довоенное время, однако всестороннее исследование их свойств и широкое внедрение в практику начато только в шестидесятые годы. Наибольшее распространение эти покрытия находят на загрязняемых подстанциях, значительно реже они применяются на участках ВЛ, хотя и здесь намечается тенденция к расширению их использования.

**Ключевые слова:** гидрофобизация поверхности, фарфоровые изоляторы, гирлянда изоляторов, распределение напряжения.

В качестве гидрофобного покрытия используются различные кремнийорганические, эпоксифенольные и фторопластиковые лаки. Основными функциями таких покрытий являются водоотталкивающие свойства покрытой поверхности и увеличение влагоразрядного напряжения в условиях увлажнения. Гидрофобизация поверхности является эффективной мерой для предотвращения перекрытий изоляторов при рабочем напряжении [1, 2].

Три основные группы гидрофобных покрытий: 1) пластичные вязкие пасты типа вазелинов; 2) жидкие покрытия; 3) покрытия в виде твердых плёнок.

В настоящее время на энергопредприятиях Украины преимущественно используются пластические покрытия на основе кремнийорганических вазелинов (пасты КВ-3, КПД и т.д.). Однако их применение имеет ряд недостатков:

- основной способ нанесения этих покрытий - ручной, что требует больших трудозатрат и отключения оборудования на длительное время при снятии отработанного слоя и нанесении нового;

- оседающие твердые частицы погружаются в пасту и через определенное время насыщают ее;

- атмосферные и химические воздействия в сочетании с загрязнением вызывают окислительные реакции, в результате чего происходит затвердение покрытия и потеря гидрофобных свойств.

© П. Е. Пономарев, А.П. Пономарева, 2014

Однако наиболее перспективным направлением является использование твердых гидрофобных покрытий. Покрытия в виде твердых плёнок относятся к долговечным покрытиям и могут эксплуатироваться длительный период времени.

Наибольшее распространение гидрофобные покрытия получили для фарфоровых изоляторов оборудования электрических подстанций (например, высоковольтные вводы, трансформаторы напряжения и пр.), но также они применяются для линейных подвесных изоляторов. Ниже приведена таблица внедрения гидрофобных покрытий в Украине.

Таблица – Сведения о гидрофобизированных объектах

№ п/п	Объект гидрофобизации	Дата гидрофобизации
<b>1994 г.</b>		
1	п/ст 35/10 кВ «Хрестище», «Райалександровка» (Донбассэнерго)	апрель
2	п/ст 35/10 кВ «Седово» (Донбассэнерго)	апрель
3	п/ст 35/10 кВ «Бородинская» (Запорожьеоблэнерго)	апрель
4	ВЛ 110 кВ СлавГРЭС - Славянск (Донбассэнерго) - изоляторы ПСС120, ПС 120	июль
5	Славянская дистанция Донецкой ж.д. - изоляторы ПФС 70А	сентябрь
6	ВЛ 110 кВ Заря - Ильича (Донбассэнерго) - изоляторы ПСС120, ПС 120	октябрь
<b>2010 г.</b>		
7	ОРУ-330 кВ Кураховская ТЭС: разъединители, линейная изоляция	май-ноябрь
8	ОРУ-330 кВ Зуевская ТЭС: высоковольтные вводы, разъединители, конденсаторы связи	октябрь-ноябрь
9	ОРУ-330 кВ Славянская ТЭС г. Николаевка	ноябрь
<b>2011 г.</b>		
10	ОРУ-330 кВ Кураховская ТЭС: разъединители, линейная изоляция	май-ноябрь
11	ОРУ-330 кВ Зуевская ТЭС: высоковольтные вводы, разъединители, конденсаторы связи	август
<b>2012 г.</b>		
12	п/ст 110 кВ ООО «Электросталь»: высоковольтные вводы силовых трансформаторов и элегазовых выключателей, опорно-стержневая изоляция разъединителей, шинных мостов, вентиляных выпрямителей	июль - август

Продолжение таблицы

13	п/ст 35 кВ «Трудовская» (г. Донецк) проходные изоляторы и вводы 35 и 6 кВ; усиление герметизации	октябрь
<b>2013 г.</b>		
14	п/ст 35 кВ «Медведево», «Вольная» Евпаторийских высоковольтных РЭС: высоковольтные вводы вакуумных выключателей	январь
15	п/ст 110/35/10 кВ «Дашуковка» Уманьских ЭС ПАО «Черкасыоблэнерго»: высоковольтные вводы силовых трансформаторов и масляных выключателей	июнь
16	ОРУ-150 кВ ПАО «Запорожжкокс»: линейная изоляция (ЛК 70/220-7)	июль
17	РП-27 п/ст «ОФ-2» Полтавского ГОК: опорные и проходные изоляторы шинных мостов, поверхность шин	август
18	Иловайская дистанция электроснабжения ГП «Донецкая железная дорога»: изоляция ячеек пунктов группировки	сентябрь-октябрь
19	Старобешевская ТЭС ПАО «Донбассэнерго»: опорно-стержневые изоляторы разъединителей ВРП-110 кВ	ноябрь
20	п/ст 110/35/6 кВ «Здолбунів-ЦШК» ПАО «Рівнеобленерго»: высоковольтные вводы силовых трансформаторов, опорно-стержневая изоляция шинных мостов, разрядники	ноябрь

**Результаты моделирования распределения напряжения по гирлянде изоляторов.** Гидрофобное покрытие обладает следующими характеристиками:  $\rho_v = 5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14}$  Ом·см,  $\gamma = (2-6) \cdot 10^{-13}$  См,  $\epsilon = 1,5-3,5$ . Исходя из данных характеристик, были проведены расчеты электрического поля для одиночных линейных и опорно-стержневых изоляторов. Исходя из этих расчетов, можно сделать вывод, что гидрофобное покрытие на 1-2% уменьшает напряженность поля [3, 4].

Поэтому представляет интерес рассмотреть влияние гидрофобного покрытия на распределение напряжения в гирлянде линейных подвесных изоляторов. Технические возможности пакета прикладных программ по расчету электрических полей (например, FEMM 4.2) накладывают определенные ограничения на моделирование исследуемых объектов. Таким образом, невозможно задать слишком

большое количество узловых точек и областей материалов с различными характеристиками а также составляет сложность разбиение базовых линий на отдельные элементы.

Для расчетов в качестве модели была выбрана гирлянда из четырех изоляторов типа ПСС-70Б со строительной высотой  $H = 146$  мм. С целью упрощения модели принято допущение, что за исключением мест крепления к травеси и высоковольтного провода, области металлической арматуры и цементно-песчаной заделки объединены в одну с параметрами  $R = 10^7$  Ом·м,  $\epsilon = 100$ . Материал изоляционной детали стекло:  $R = 10^{12}$  Ом·м,  $\epsilon = 7$ . Окружающая среда воздух:  $R = 10^{16}$  Ом·м,  $\epsilon = 1$ . Полимерное покрытие, по аналогии с используемыми покрытиями на основе кремнийорганических компаундов холодного отверждения, было задано в виде тонкого ( $\Delta = 0,2$  мм) равномерного слоя по поверхности с параметрами:  $R = 10^{13}$  Ом·м,  $\epsilon = 3$ . Общий вид модели приведен на рис.1.

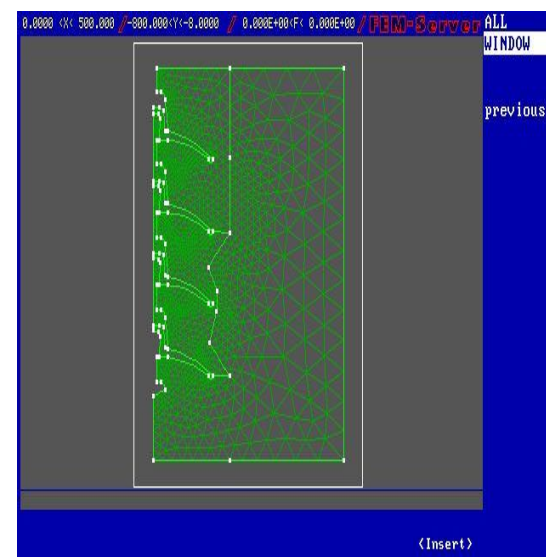


Рис.1 – Общий вид расчетной модели

Анализ полученных данных показал, что наличие покрытия не оказало заметного влияния на распределение потенциалов по гирлянде изоляторов, значения которых составили (при обходе от «высокого» потенциала к «низкому»):

- для 1-го изолятора (между узлами № 1523 и № 1052) 14,3 кВ;
- для 2-го изолятора (между узлами № 1052 и № 465) 11,7 кВ;
- для 3-го изолятора (между узлами № 465 и № 9) 11,0 кВ;
- для 4-го изолятора (между узлами № 9 и № 442) 3,0 кВ.

Фрагмент распределения потенциалов рассматриваемой модели приведен на рис.2.

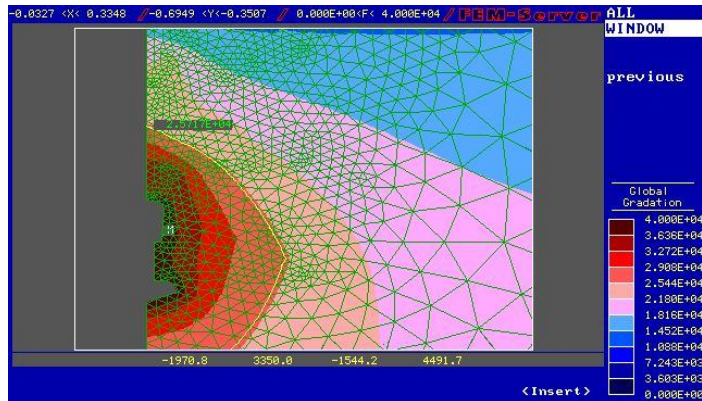


Рис.2 – Фрагмент распределения потенциалов рассматриваемой модели

График зависимости напряжения  $U$  от порядкового номера изолятора в гирлянде показан на рис.3.



Рис. 3 – Зависимость напряжения  $U$  от порядкового номера изолятора в гирлянде

**Выводы:** 1. Нанесение гидрофобного покрытия на изоляционную поверхность не оказывает существенного влияния на распределение напряжения по гирлянде линейных подвесных изоляторов.

2. Применение гидрофобизации изоляторов и вводов высоковольтных устройств в зонах повышенных атмосферных и химических загрязнений энергетических объектов Украины показало ее эффективность.

**Список литературы:** 1. *Набока Б.Г.* Розрахунки електростатичних полів в електроізоляційній техніці / Б. Г. Набока. – Київ: ІСДО, 1995. – 120 с. 2. Химическая энциклопедия: В 5 т.: т. 2: Даффа-Меди / Редкол.: Кнунянц И. Л. (гл. ред.) и др. - М.: Сов. энцикл., 1990. - 671 с. 3. Дмитриевский В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции / В. С. Дмитриевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с. 4. Перенапряжения и координация изоляции. Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86) / Под ред. С.Д. Лизунова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - С. 61-72.

**Bibliography (transliterated):** 1. Naboka B.G. *Rozrahunki elektrostatchnih poliv v elektroizoljacijnij tehnici* Kiiiv: ISDO, 1995. 2. Himicheskaja jenciklopedija: V 5 t.: t. 2: Daffa-Medi / Redkol.: Knunjanc I. L. (gl. red.) i dr. - M.: Sov. jencikl., 1990. 3. Dmitrievskij V. S. *Raschet i konstruirovanie jelektricheskoj izoljacji*. Moscow: Energoizdat, 1981. 4. *Perenaprjazhenija i koordinacija izoljacji*. Perevody dokladov Mezhdunarodnoj konferencii po bo'shim jelektricheskim sistemam (SIGRJe-86) Pod red. S.D. Lizunova. – Moscow: Energoatomizdat, 1988. 61-72. Print

Надійшла (received) 10.03.2014

**Н.В.РУДЕВІЧ**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХП»

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК УЗДОВЖ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

В статті пропонується результати дослідження розповсюдження вищих гармонік уздовж лінії електропередач, здобутих у результаті комп'ютерної реалізації математичної моделі лінії електропередач у фазних координатах. Порівняно форму кривих струму та напруги на початку та в кінці лінії. Зроблено висновки щодо впливу довжини лінії, наявності грозозахисного тросу на розповсюдження вищих гармонік.

**Ключові слова:** вищі гармоніки, математична модель, лінія електропередач, фазні координати, комп'ютерне моделювання.

**Постановка проблеми.** В теперішній час присутність вищих гармонік в сигналах струму та напруги є звичайним явищем, що робить вплив на роботу електроенергетичної системи. В загальному випадку розповсюдження вищих гармонік залежить від схеми системи та параметрів елементів системи. Дослідження процесів в елементах енергосистеми при розповсюдженні гармонік є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Одним з основних функціональних елементів електроенергетичної системи є лінії електропередач (ЛЕП). Відома робота, де при дослідженні розповсюдження вищих гармонік уздовж ЛЕП використовують однофазну математичну модель ЛЕП в усталеному режимі [1]. Розповсюдження розглянуто для кожної гармоніки окремо з подальшим використанням принципу суперпозиції. Зрозуміло, що таке дослідження є обмеженим і не дозволить, наприклад, дослідити перехідні режими. Доцільно використовувати математичну модель ЛЕП в фазних координатах з миттєвими значеннями струмів та напруг. В роботі [2] наведена математична модель ЛЕП в фазних координатах з урахуванням усіх впливаючих факторів.

**Мета статті.** Дослідити розповсюдження вищих гармонік уздовж ЛЕП за допомогою математичної моделі ЛЕП в фазних координатах.

**Основні матеріали досліджень.** Дослідження несинусоїдального режиму на ЛЕП проводилося з урахуванням впливу довжини лінії та наявності грозозахисного тросу. На рис.1 представлено схему заміщення ідеально транспонованої одноцепної лінії електропередач з урахуванням усіх впливаючих факторів в несинусоїдальних режимах, що складається з однієї ділянки

© Н.В. Рудевіч, 2014

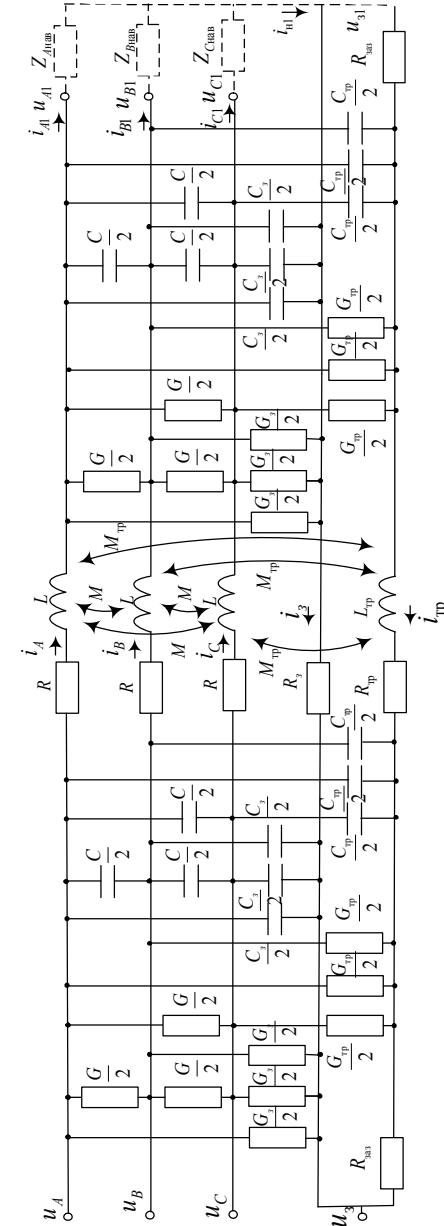


Рис. 1 – Схема заміщення одноцепної лінії електропередач з заземленим тросом з обох боків лінії

Реалізація математичної моделі була здійснена на комп'ютері в пакеті Simulink програми Matlab. Для зручності вихідні данні лінії електропередач та формули для розрахунку параметрів моделі були введені за допомогою М-файлу. Вихідні параметри лінії були прийняті наступні [3]:  $U_{ном} = 110\text{кВ}$ ; марка проводу АС-120/19 з параметрами: радіус дроту фази  $r_{\phi} = 0.0076\text{ м}$ , питомий опір дроту  $R_{длит} = 0.244\text{ Ом/км}$ , втрати на корону  $\Delta P_{кор} = 0.08\text{ кВт/км}$ ; стальна опора П110-5 у разі одноцепної ЛЕП.

Розрухунок середньої геометричної відстані між дротами фаз  $d_{\phi}$ , середньої геометричної відстані від тросу до дротів фаз  $d_{тр-\phi}$ , середньої відстані дротів фаз до їх дзеркальних відображень відносно поверхні землі  $D_{\phi-зв}$ , середньої відстані від тросу до дзеркальних відображень дротів фаз відносно поверхні землі  $D_{тр-зв\phi}$ , середньої відстані від дротів фаз до дзеркальних відображень дротів сусідніх фаз відносно поверхні землі  $D_{\phi-зв\phi}$ , відстані від тросу до його дзеркального відображення відносно поверхні землі  $D_{тр-зв}$  було здійснено за формулами, що наведені в [4], згідно з даних геометричних розмірів опор для одноцепної ЛЕП [3]:  $d_{\phi} = 6,5\text{ м}$ ,  $d_{тр-\phi} = 7\text{ м}$ ,  $D_{\phi-зв} = 42\text{ м}$ ,  $D_{тр-зв\phi} = 49,1\text{ м}$ ,  $D_{\phi-зв\phi} = 42,3\text{ м}$ ,  $D_{тр-зв} = 56\text{ м}$ . У якості троса було прийнято сталевий канат з поперечним перерізом  $S = 48,64\text{ мм}^2$ .

За допомогою моделі досліджувалось розповсюдження 2-ої, 3-ої, 4-ої, 5-ої, 7-ої, 9-ої, 11-ої, 13-ої гармонік в усталеному режимі, амплітуди відповідних гармонік джерела симетричної напруги ЛЕП були прийняті однакові, а саме 0,015 від амплітуди основної гармоніки, тобто  $0,015 * 89550 = 1340\text{В}$ . Навантаження ЛЕП було прийнято симетричним, лінійним, активно-індуктивного характеру з  $\cos\phi_{нав} = 0,83$ .

В процесі комп'ютерного моделювання отримано значення амплітуд гармонічних складових напруги на навантаженні  $U_{nagr}$ , струму навантаження  $I_{nagr}$ , струму в лінії  $I_{line}$ , струму джерела напруги  $I_{source}$  та струмів витоку  $I_{loss}$  при різній довжині одноцепної ЛЕП без тросу (табл.1, табл. 2, табл.3).

Таблиця 1 – Значення амплітуд гармонічних складових параметрів режиму ЛЕП без тросу при довжині лінії 50 км

$n$	$I_{source}, \text{ A}$	$I_{line}, \text{ A}$	$I_{nagr}, \text{ A}$	$I_{loss1}, \text{ A}$	$I_{loss2}, \text{ A}$	$U_{nagr}, \text{ кВ}$
1	229	232	235	5,74	5,4	84,7
2	2,2	2,4	2,5	0,17	0,16	1,25
3	1,36	1,5	1,6	0,14	0,11	1,06

Продовження таблиці 1

$n$	$I_{source}, \text{ A}$	$I_{line}, \text{ A}$	$I_{nagr}, \text{ A}$	$I_{loss1}, \text{ A}$	$I_{loss2}, \text{ A}$	$U_{nagr}, \text{ кВ}$
4	0,9	1,2	1,45	0,35	0,32	1,25
	0,5	0,85	1,2	0,43	0,4	1,25
6	0,4	0,65	0,85	0,28	0,23	1,08
7	0,4	0,4	0,9	0,6	0,58	1,3
9	0,25	0,3	0,63	0,42	0,37	1,17
11	1,34	0,43	0,62	0,95	1	1,4
13	1,8	0,7	0,56	1,13	1,24	1,48

Таблиця 2 – Значення амплітуд гармонічних складових параметрів режиму ЛЕП без тросу при довжині лінії 100 км

$n$	$I_{source}, \text{ A}$	$I_{line}, \text{ A}$	$I_{nagr}, \text{ A}$	$I_{loss1}, \text{ A}$	$I_{loss2}, \text{ A}$	$U_{nagr}, \text{ кВ}$
1	211	217	222,5	11,5	10,2	80,2
2	1,9	2	2,3	0,35	0,3	1,2
3	0,9	1,2	1,3	0,3	0,19	0,9
4	0,5	0,9	1,4	0,69	0,62	1,2
5	0,65	0,5	1,2	0,86	0,8	1,25
6	0,3	0,45	0,8	0,56	0,42	1
7	1,55	0,43	1	1,21	1,26	1,4
9	1	0,3	0,75	0,86	0,9	1,42
11	3,9	2,1	0,95	1,9	3	2,15
13	5,3	3,6	1,05	2,25	4,6	2,75

Таблиця 3 – Значення амплітуд гармонічних складових параметрів режиму ЛЕП без тросу при довжині лінії 150 км

$n$	$I_{source}, \text{ A}$	$I_{line}, \text{ A}$	$I_{nagr}, \text{ A}$	$I_{loss1}, \text{ A}$	$I_{loss2}, \text{ A}$	$U_{nagr}, \text{ кВ}$
1	195	204	212	17,25	14,65	76,3
2	1,5	2	2,2	0,5	0,45	1,1
3	0,6	1	1,2	0,45	0,25	0,8
4	0,8	0,7	1,4	1,05	0,95	1,2
5	1,4	0,45	1,25	1,3	1,27	1,32
6	0,7	0,3	0,85	0,85	0,65	1,07
7	3	1,3	1,25	1,8	2,4	1,8
9	1,6	0,95	1,2	1,28	2	2,1
11	4,6	4,3	1,1	2,84	5,4	2,5
13	2,5	2,8	0,5	3,35	3,35	1,35

При моделюванні процесів в ЛЕП при наявності тросу було враховано активний опір заземлителя ( $R_{заз}$ ) опор з обох боків лінії, який



було просумовано з активним опором тросу. Такий підхід справедливий, якщо заземлена нейтраль трансформатора на підстанції безпосередньо не з'єднана з заземлітелем першої опори (табл.4).

Таблиця 4 – Значення амплітуд гармонічних складових параметрів режиму ЛЕП з тросом при довжині лінії 150 км

$n$	$I_{source}, A$	$I_{line}, A$	$I_{nagr}, A$	$I_{loss1}, A$	$I_{loss2}, A$	$U_{nagr}, kV$
1	193,5	203,5	212	19,35	16,5	76,3
2	1,5	1,9	2,2	0,6	0,5	1,1
3	0,55	0,95	1,25	0,55	0,35	0,82
4	1	0,65	1,45	1,15	1,05	1,24
5	1,7	0,5	1,3	1,42	1,5	1,38
6	1,15	0,32	1,05	1,1	1,05	1,28
7	3,6	1,7	1,35	2	3	1,95
9	2,24	1,65	1,25	1,7	2,8	2,25
11	3,85	4,4	1,05	3,2	5,46	2,27
13	2,4	2,8	0,45	3,75	3,2	1,13

З таблиць 1, 2, 3 бачимо, що зі збільшенням частоти та довжини лінії амплітуда 2, 4, 5, 7, 11 та 13 гармонік струму витоку збільшується через зменшення ємнісного опору. Амплітуда гармонік струму витоку, що кратні трьом, також збільшується зі збільшенням частоти та довжини лінії, але їхні значення будуть декілька нижче, у зв'язку з відсутністю струмів витоку між сусідніми фазами. Отже, спотворення синусоїдальності кривих струмів витоку будуть значними (рис. 2).

В ході дослідження було встановлено, що при певній частоті, гармоніка струму лінії буде випереджувати відповідну гармоніку напруги джерела напруги, що буде призводити до збільшення амплітуди цієї гармоніки в сигналі напруги навантаження. Це пояснюється тим, що при збільшенні частоти напруги, поперечний ємнісний опір зменшується, отже, збільшується ємнісний струм, який стає більше, ніж індуктивний струм навантаження.

Наявність тросу у ЛЕП призводить до збільшення струмів витоку через те, що зменшується еквівалентний ємнісний опір (табл. 4). Унаслідок цього зменшується порядок гармоніки, при якій напруга на навантаженні стає більше ніж у джерела. Протікання струмів 3, 6, 9 гармонік в тросі практично не впливає на рівень амплітуд відповідних гармонік в фазах, через їх малі значення ( $I_{m3,6,9}=1\div 3A$ ).

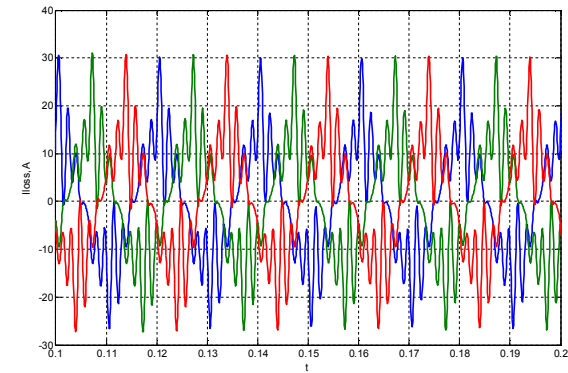


Рис.2 – Криві струму витоку фаз А, В, С

**Висновки.** Таким чином, за допомогою створеної комп'ютерної моделі ЛЕП в фазних координатах можна досліджувати розповсюдження вищих гармонік як в ustalених, так і в перехідних режимах.

**Список літератури.** 1. Нгуен Динь Дык Разработка методики исследования распространения высших гармоник в электроэнергетических системах: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.14.02 / Нгуен Динь Дык. – М., 2008. – 29 с. 2. Рудевич Н.В. Математична модель лінії електропередач в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів / Н.В. Рудевич // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харков: НТУ «ХПІ». – 2013. - № 59. – С. 117 – 123 3. Справочник по проектированию линий электропередачи / М.Б. Вязьменский, В.Х. Ишкин, К.П. Крюков и др. ; под ред. М.А. Реута, С.С. Рокотяна. – М. : Энергия, 1980. – 296с. 4. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы / С.А. Ульянов. – М. : Энергия, 1970. – 520с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Nguen Din' Dyk *Razrabotka metodiki issledovaniya rasprostraneniya vysshih harmonik v jelektroenergeticheskix sistemah: avtoref. dis. kand. tehn. nauk* : 05.14.02. M., 2008. – 29 p. 2. Rudevich N.V. *Matematichna model' liniijelektroperedach v faznix koordinatah dlja doslidzhennja elektromagnitnih perehidnih procesiv* *Visnik NTU «HPI»*. Serija: *Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist'*. NTU «HPI», 2013. No. 59. 117-123 Print. 3. *Vjaz'menskij M.B., Ishkin V.H., Krjukov K.P. Spravchochnik po proektirovaniju linij jelektroperedachi*. M: Jenergija, 1980. 4. Ul'janov S.A. *Jelektromagnitnye perehodnye processy* / S.A. Ul'janov. – M: Jenergija, 1970.

Надійшла (received) 11.03.2014

*С. О. СОКОЛ* с-т НТУ «ХП»

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИРІВНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОСТІ І ПОТЕНЦІАЛУ ВЗДОВЖ СТРИЖНЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРУ НА ВИХОДІ ЙОГО ІЗ ПАЗУ СТАТОРА

Приведені існуючі методи вирівнювання електричного поля в зонах підвищеної напруженості та на виході стрижня із пазу, наведені програмні розрахунки і побудована картина розподілу напруженості електричного поля без використання та з використанням напівпровідної стрічки. Розглянуті можливості градування ізоляції та показано можливість виникнення поверхневих та часткових розрядів в зоні нерівномірної напруженості електричного поля.

**Ключові слова:** частковий розряд, коронування, напруженість електричного поля, напівпровідне покриття.

**Вступ.** При ізолюванні електричних деталей турбогенераторів має місце проблема: в більшості випадків при конструюванні електричної ізоляції не вдається використовувати найкращу її форму з точки зору здобуття найбільш вигідного для роботи електроізоляційних матеріалів рівномірного поля. [1, 2, 3]

Це обумовлено тим, що в рівномірному полі ділянки електроізоляційного матеріалу мають практично однакову напруженість поля, тобто має місце найкраще його використання. У нерівномірному полі окремі ділянки електроізоляційної конструкції несуть підвищене електричне навантаження, що може привести до досить швидкого руйнування матеріалів цих областей, а на частини, що залишилися, діятиме підвищена напруженість поля, що призведе до їх руйнування.

**Аналіз літератури.** При неоднорідному електричному полі можна підвищити працездатність електричної ізоляції, знижуючи напруженість поля в найбільш навантажених ділянках шляхом збільшення розмірів конструкцій. Однак такий шлях економічно не виправдан. Другий можливий шлях — вирівнювання електричного поля в конструкції, шляхом регулювання (вирівнювання) електричного поля, створюють більш рівномірний розподіл електричного навантаження на окремих ділянках електроізоляційних матеріалів, що підвищує, як правило, їх

© С.О. Сокол, 2014

працездатність. Регулювати електричне поле можна двома способами: змінюючи або активну провідність, або ємність окремих ділянок ізоляції.

Регулювання електричного поля за допомогою активної провідності здійснюється шляхом підвищення активної провідності окремих ділянок ізоляції, що наводить до зменшення на них падіння напруги, і опору електроізоляційної конструкції, але при цьому збільшуються діелектричні втрати і підвищується температура. Тому регулювання поля за допомогою активної провідності обмежується допустимими опорами електричної ізоляції і найбільшою її температурою.

Малоефективне регулювання поля зміною активної провідності при високій частоті і при імпульсному режимі із-за великої ємнісної провідності електричної ізоляції. Регулювання поля за допомогою активної провідності доцільно використовувати на постійній і змінній напрузі низької частоти.

Зміни активної провідності можна добитися декількома шляхами:

- 1) підбором електроізоляційних матеріалів з різною провідністю;
- 2) використанням активних дільників напруги;
- 3) установкою коронуючих електродів;
- 4) вживанням напівпровідних покриттів.

Перший варіант слід використовувати при конструюванні комбінованої ізоляції, розміщуючи в області більшої напруженості поля матеріали з підвищеною провідністю. Підбираючи електроізоляційні матеріали, можна значно вирівняти розподіл потенціалів в електричній ізоляції. Проте такий підбір не завжди можливий, оскільки електроізоляційний матеріал повинен одночасно відповідати певним вимогам по механічним, тепловим і іншим властивостям. Дільника напруги для регулювання електричного поля доцільно застосовувати в тих випадках, коли він одночасно буде використовуватись і в інших цілях, наприклад для виміру напруги. Таким прикладом може служити електростатичний генератор.

За допомогою дільника напруги навряд чи можливо отримати рівномірний розподіл потенціалів, оскільки для цього необхідно було б мати безкінечно велике число зондів і елементів дільника.

Коронуючі електроди підвищують провідність ділянки проміжку, особливо значно в місці існування коронного розряду. Таким чином, в місті коронного розряду падіння напруги зменшується і розподіл потенціалів стане більш рівномірним. В той же час, використання коронного розряду для регулювання електричного поля має обмежене

вживання із-за ряду серйозних недоліків: виділяються хімічно активні продукти, викликаючи руйнування елементів конструкції; коронний розряд в рідині викликає її руйнування; створюються радіоперешкоди, що може привести до порушення нормального височастотного зв'язку по лініях електропередачі; шум від коронного розряду негативно впливає на працездатність обслуговуючого персоналу.

Напівпровідні покриття зазвичай використовують для вирівнювання електричного поля в ізоляторах, ізоляції електричних машин, кабелів і інших конструкціях. Конструкція напівпровідних покриттів досить проста. При ретельному виконанні можна отримати практично рівномірний розподіл потенціалу. Ємкісні способи регулювання електричних полів засновані на збільшенні ємкості тих ділянок електричної ізоляції, в яких необхідно понизити падіння напруги. Збільшення ємкості окремих ділянок ізоляції отримують наступними способами: 1) розміщенням в тих місцях, де потрібно понизити падіння напруги, діелектриків з підвищеною діелектричною проникністю (градирування ізоляції); 2) вживанням внутрішніх і зовнішніх екранів; 3) використанням конденсаторних обкладань. Ємкісні способи регулювання електричних полів ефективні при змінній напрузі і імпульсах.

Вживання напівпровідних покриттів підвищує напругу виникнення поверхневих розрядів в результаті зниження найбільшої напруженості поля по кордону розділу двох середовищ. Напівпровідні покриття підвищують температуру ізоляції за рахунок струму витоку, що сприяє підсушуванню її поверхні і збільшенню розрядних характеристик у вологій і забрудненій атмосфері.

Порівнявши всі можливі способи вирівнювання електричного поля, можна зробити висновок про те, що для вирівнювання поля в генераторі необхідно і найзручніше застосувати напівпровідні покриття. Не дивлячись на те, що по ним протікає струм і додатково гріє ізоляцію, іншого доцільного способу вирівняти поле в обмеженому просторі немає. Тепло, що виділиться із-за протікання струму по напівпровідних покриттях враховується на етапі виробництва і входить в тепловий розрахунок.

#### Розрахунок параметрів

Розглянемо картину поля, при напрузі на стрижні 24кВ, що ізолюваний склострічкою з просоченням ( $\epsilon=2.3$ ) товщиною в 3мм, якщо не застосовувати особливих заходів.  $E= 1.26$  МВ/м.

Для розрахунку напруженості поля на ЕВМ було використано програму FEMM 4.2. У цій програмі створюється модель паза і стрижню на виході із нього. Беруться модельні розміри конструкції, задається товщина ізоляції на стрижні і її діелектрична проникність. Задається напруга на стрижні 24 кВ, що відомо і напруга на магнітопроводі статора 0 В – оскільки він заземлений. Програма розраховує розподіл потенціалів, при використанні додаткової функції програми, вона відображає розподіл напруженості і числові значення. Графіки розподілу потенціалів і напруженості поля, а також числові значення представлені на рис.1 і 2.

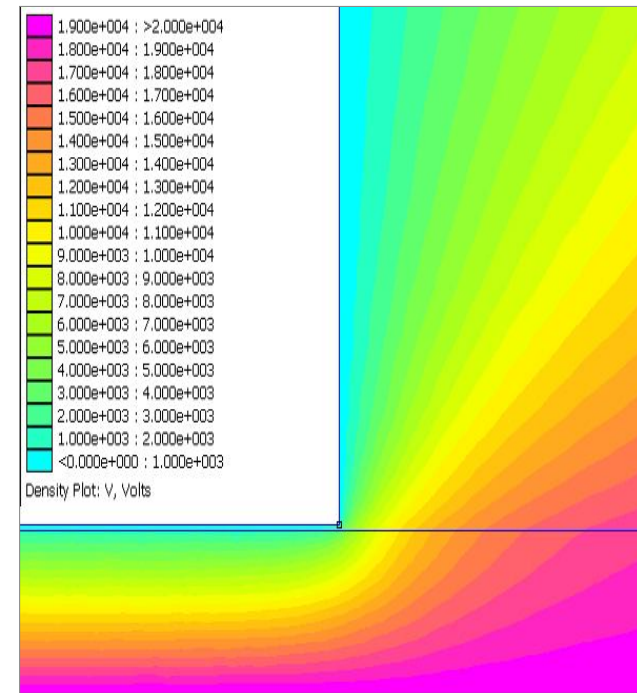


Рис.1 — Картина розподілу потенціалів на виході стрижню із паза турбогенератора

Таким чином видно, що для виключення шкідливого впливу іонізації між стрижнем і пазом необхідно прийняти заходи по вирівнюванню поля.

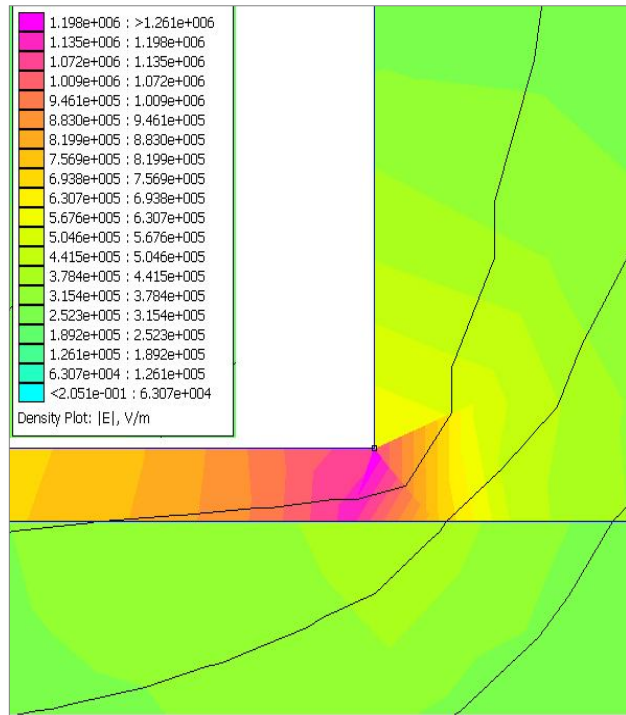


Рис.2 - Картина поля напруженості на виході стрижню з паза турбогенератора

На рис.3 показано розподіл напруженості поля при градуванні ізоляції, коли вона складається з кількох шарів з різними діелектричними проникностями. При розрахунку було використано 3 шарову модель з  $\epsilon_1=7$ ,  $\epsilon_2=5$ ,  $\epsilon_3=2.3$  відповідно.

Цей метод знайшов широке використання, обґрунтований економічною доцільністю і простотою технологічного впровадження.

На рис.4 показано зони підвищеної напруженості електричного поля в ізоляції стрижня в місцях його виходу з паза турбогенератора.

Розрахунки показують, що в цих зонах можливо виникнення поверхневих та часткових розрядів в ізоляції.

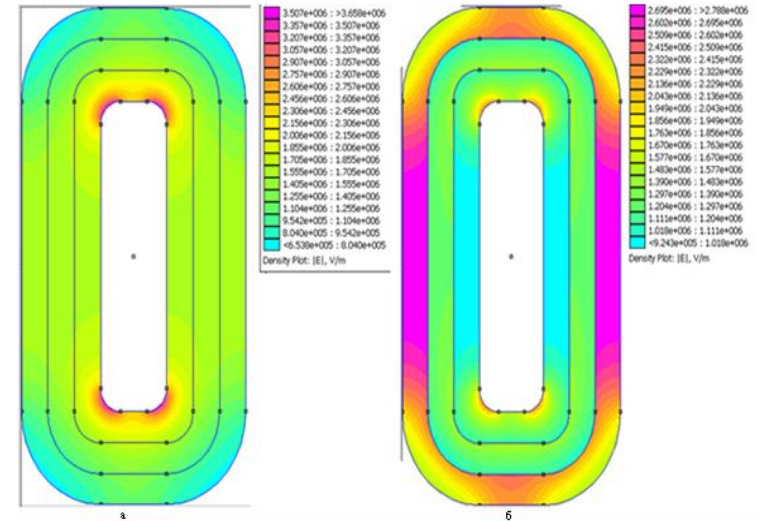


Рис.3 — Результати розрахунку напруженості електричного поля без використання градування ізоляції (а) та з ним (б)

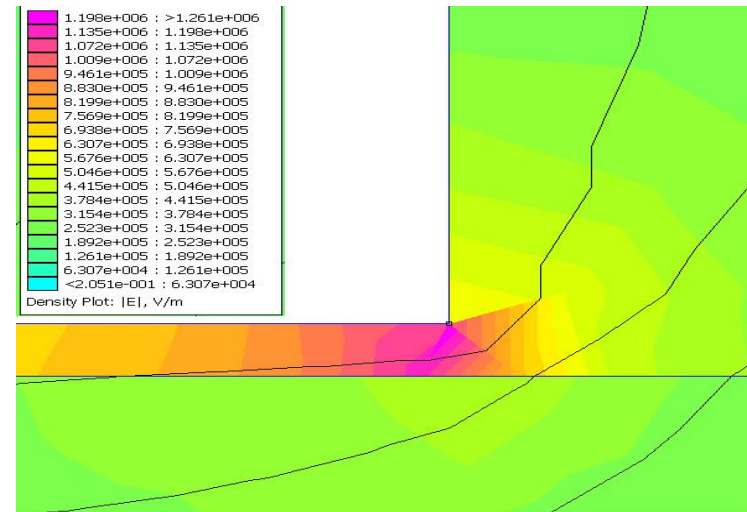


Рис.4 — Розподіл напруженості електричного поля на виході стрижню із паза статора турбогенератора

**Висновок:** 1. Приведені існуючі методи вирівнювання електричного поля.

2. Наведені картини розподілу напруженості електричного поля вздовж стрижня на виході його із пазу статора турбогенератора.

3. Показано, що нерівномірний розподіл напруги вздовж стрижня може призводити до поверхневих та часткових розрядів в ізоляції.

**Список литературы:** 1. В. С. Дмитриевский Расчет и конструирование изоляции: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981, - 392 с., ил. 2. Ю. В. Зозулін, О. Є. Антонов, В. М. Бичік, А. М. Боричевський, К. О. Кобзар, О. Л. Лівшиць, В. Г. Ракогон, І. Х. Роговий, Л. Л. Хаймович, В. І. Чередник. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій – Харків: ПФ «Колегіум», 2011, - 228 с. 3. Исследование и разработка исполнения обмоток статоров турбогенераторов, стойких к воздействию пожаробезопасного масла ОМТИ / Р. Е. маламуд, Г. Е. Шумовская, С. Г. Вина рева, Т. М. Степанова // Новые разработки в области электрической изоляции. (Сб. статей по обмену опытом ЦП ВНТОЭ). Л.: Энергоатомиздат. 1991. с.15-18

**Bibliography (transliterated):** 1. V. S. Dmitrievskij *Raschet i konstruirovanie izoljacii: Ucheb. posobie dlja vuzov.* Moscow: Energoizdat, 1981. 2. Ju. V. Zozulin, O. E. Antonov, V. M. Bichik, A. M. Borichevskij, K. O. Kobzar, O. L. Livshic', V. G. Rakogon, I. H. Rogovij, L. L. Hajmovich, V. I. Cherednik. *Stvorennja novih tipiv ta modernizacija dijuchih turbogeneratoriv dlja teplovih elektrichnih stancij.* Harkiv: PF «Kolegium», 2011. 3. R. E. malamud, G. E. Shumovskaja, S. G. Vina reva, T. M. Stepanova *Issledovanie i razrabotka ispolnenija obmotok statorov turbogeneratorov, stojkih k vozdejstviju pozharobezopasnogo masla OMTI Novye razrabotki v oblasti jelektricheskoi izoljacii.* (Sb. statej po obmenu opytom CP VNTOTe). L.: Jenergoatomizdat. 1991.

*Надійшла (received) 18.05.2014*

УДК 678

**В. Л. ЧУЛЕЕВ**, ведущий инженер НТЦ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков;

**В. М. ЗОЛОТАРЕВ**, д-р техн. наук, Генеральный директор ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков;

**Е. В. ЧУЛЕЕВА**, канд. техн. наук, главный специалист по полимерным материалам НТЦ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков;

**С. Ю. АНТОНЕЦ**, начальник лаборатории электрических испытаний и пожарной безопасности ЦЗЛ ПАО «ЗАВОД «ЮЖКАБЕЛЬ», Харьков.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению электрофизических свойств полимерных композиций на основе поливинилхлорида (ПВХ). Изучены влияния ингредиентов на технологические свойства ПВХ композиций. Определены основные отличия электрофизических свойств материалов изоляции в зависимости от водопоглощения.

**Ключевые слова:** поливинилхлорид (ПВХ), удельное объемное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, время выдержки в воде, водопоглощение, изоляция, полимерная композиция.

Поливинилхлорид (ПВХ) является одним из наиболее известных многотоннажных и практически важных полимерных продуктов. На его основе получают полумягкие и мягкие (пластифицированные) полимерные композиции, используемые в производстве кабелей и проводов.

Основной проблемой ПВХ является его весьма низкая стабильность. Поэтому при хранении, переработке и эксплуатации ПВХ, а также при получении, хранении и использовании полимерных композиций и кабельно-проводниковой продукции (КПП) на его основе необходимо применять совокупность методов, приводящих к повышению устойчивости ПВХ к действию различных факторов, к его стабилизации [1].

В [2] показана эффективность использования сочетания солей

© Чулеев В. Л., Золотарев В. М., Чулеева Е. В., Антоненц С. Ю., 2014

органических кислот Ca и Zn при получении нетоксичных материалов из ПВХ для изоляции кабельной продукции.

Целью настоящей работы являлось исследование электрофизических свойств вышеуказанных поливинилхлоридных изоляционных композиций для низковольтных силовых кабелей.

Электрофизические свойства характеризуются величинами удельного электрического сопротивления, электрической прочности (прочности на пробой), диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь. Значение этих характеристик и их зависимости от агрессивных факторов (в частности влагопоглощение), температуры и частоты электрического поля определяют выбор ПВХ изоляционных композиций.

Удельное электрическое сопротивление определяется наличием свободных зарядов (электронов и ионов) и их подвижностью.

Электрическая прочность – напряженность электрического поля, при которой происходит пробой – мера электрической прочности данного материала.

Диэлектрическая проницаемость композиционного материала определяется отношением емкости электрического конденсатора, заполненного диэлектриком к емкости того же конденсатора в вакууме.

Под диэлектрическими потерями понимают часть энергии электрического поля, которая необратимо рассеивается в диэлектрике в форме теплоты.

Требования к полимерным композициям для низковольтных силовых кабелей низкого напряжения определяется [3, 4].

Максимальная температура эксплуатации полимерных композиций (максимальная температура токопроводящей жилы в нормальном режиме работы) 343 К.

Материалы предназначены для использования при изготовлении низковольтных силовых кабелей и подразделяются на:

- общего назначения;
- для гибких кабелей (в том числе с прозрачной изоляцией);
- для использования при низких температурах;
- гибкие, общего назначения, которые используют при низких температурах.

Для исследований использовались образцы ПВХ композиций для изоляции, состав которых приведен в [2].

Промышленные партии изготавливались на линии компаундирования ПВХ пластикатов фирмы X-Compound. Наложение изоляции на КПП производили на линиях изолирования ME 160, ME

90. Регулирование свойств осуществлялось также использованием оптимального количества пластификаторов в соответствии с [5]. Свойства исследуемых композиций приведены в таблице.

Таблица. Свойства исследуемых композиций

№ п/п	Наименование показателей	Тип композиции			
		1	2	3	4
1	Тип	Для гибких кабелей (в том числе с прозрачной изоляцией)	Для использования при низких температурах	Общего назначения	Гибкие, общего назначения для использования при низких температурах
2	Показатель текучести расплава, г/10мин, T = 463 К, 10 кг	15,3	10,7	14,3	14,7
3	Время выдержки до появления черной окраски, мин, при T = 463 К	90	120	120	135
4	Максимальный крутящий момент, T = 463 К, v = 30 об/мин	39,0	32,0	46,8	38,2
5	Равновесный крутящий момент, Н·м, T = 463 К, v = 30 об/мин	28,8	23,8	30,1	26,4
6	Удельное объемное электрическое сопротивление при T = 293 К, Ом·см	$1,6 \cdot 10^{14}$	$3,0 \cdot 10^{14}$	$2,1 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{14}$
7	Прочность при разрыве, МПа	265,5	270,6	267,0	268,5
8	Относительное удлинение при разрыве, %	314,6	317,3	324,0	340,0
9	Потеря массы при T = 433 К в течение 6 ч, %	2,2	1,7	1,6	1,4
10	Сохранение прочности при разрыве после выдержки при T = 373 ± 2 К в течение 168 ч, МПа (%)	264,8 (99,8)	232,9 (86,0)	274,2 (92,6)	247,8 (92,3)
11	Сохранение относительного удлинения при разрыве после выдержки при T = 373 ± 2 К в течение 168 ч, % (%)	260 (82,6)	260 (82,0)	268 (82,7)	280 (82,3)

Сравнительный анализ разработанных полимерных композиций показывает, что во всех случаях присутствие в полимерных



композициях эпоксидированного соевого масла (ЭСМ), приводит к повышению текучести расплава и увеличению термостабильности. Одновременно более высокие значения термостабильности наблюдаются при введении в полимерные композиции антиоксидантов фенольного типа и серосодержащих соединений.

Вместе с тем ПТР и термостабильность полимерных композиций при 463 К не позволяет однозначно делать вывод о поведении ПВХ композиций при переработке. Для определения технологических свойств ПВХ композиций близких к переработке (при тепловом воздействии и условиях деформаций сдвига одновременно) определяли максимальный крутящий момент и равновесный крутящий момент на приборе «Brabender Plasticorder» при температуре 463 К и скорости вращения 30 об/мин.

Результаты этих исследований показывают высокие максимальный и равновесный крутящие моменты для композиции № 3, более низкие – для композиции № 2. Это свидетельствует о необходимости переработки материала соответственно при высоких и низких напряжениях сдвига.

Физико-механические характеристики исследуемых полимерных композиций значительно превышают требования нормативной документации [3].

Подготовку образцов для исследований электрофизических свойств проводили в соответствии с [6 – 9].

Измерение объемного электрического сопротивления осуществляли с помощью кабельного измерителя сопротивления изоляции «КИСИ-1» при напряжении 1000 В с допускаемой основной погрешностью  $\pm 10\%$ .

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь и электрической емкости (для дальнейшего расчета диэлектрической проницаемости среды) осуществляли с помощью моста переменного тока Р 589 при напряжении 24 В частотой 1 кГц с допускаемой основной погрешностью  $\pm 0,1\%$  при измерении емкости и  $\pm (0,02 \cdot \text{tg}\delta + 3 \cdot 10^{-4})$  при измерении тангенса угла диэлектрических потерь.

Обработка результатов осуществлялась при помощи стандартной компьютерной программы Microsoft Excel. Графические зависимости строились с помощью программы Graph 3D.

Измерение электрофизических показателей ПВХ композиций производились на образцах толщиной  $1,0 \pm 0,1$  мм изготовленных вальцево-прессованным методом по [7] при  $T = 293$  К.

Расчеты вышеуказанных параметров проводили по формулам:

### 1. Удельное объемное электрическое сопротивление

$$\rho_v = \frac{\pi \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2}{4 \cdot t} \cdot R_v,$$

где  $d_1$  – диаметр измерительного электрода, м;  
 $d_2$  – внутренний диаметр охранного электрода, м;  
 $t$  – толщина образца;  
 $R_v$  – измеренное сопротивление, Ом.

### 2. Диэлектрическая проницаемость среды

$$\varepsilon = 0,144 \cdot C_x \cdot \frac{t}{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2},$$

где  $d_1$  – диаметр измерительного электрода, м;  
 $d_2$  – внутренний диаметр охранного электрода, м;  
 $t$  – толщина образца;  
 $C_x$  – измеренная емкость, пФ.

### 3. Тангенс угла диэлектрических потерь

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{пар}} \cdot R_{\text{пар}}} = \omega \cdot C_{\text{посл}} \cdot R_{\text{посл}},$$

где  $\omega$  – угловая частота, рад/с;  
 $C_{\text{пар}}$  – измеренная емкость в эквивалентной параллельной схеме замещения, пФ;  
 $R_{\text{пар}}$  – измеренное сопротивление в эквивалентной параллельной схеме замещения, Ом;  
 $C_{\text{посл}}$  – измеренная емкость в эквивалентной последовательной схеме замещения, пФ;  
 $R_{\text{посл}}$  – измеренное сопротивление в эквивалентной последовательной схеме замещения, Ом.

Представляет интерес изменения электрофизических свойств полимерных композиций после воздействия воды.

Зависимость водопоглощения от времени выдержки образцов в воде представлена на рис. 1.

Определение электрофизических показателей полимерных композиций проводили после выдержки в воде.

По полученным результатам строили графики зависимости удельного объемного электрического сопротивления, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь от времени выдержки в воде при  $T = 293$  К (рис. 2, 3, 4).



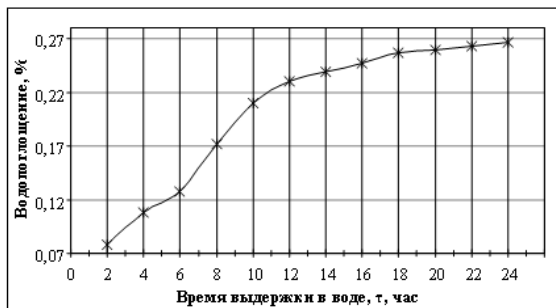


Рис. 1 – Зависимость водопоглощения от времени выдержки в воде

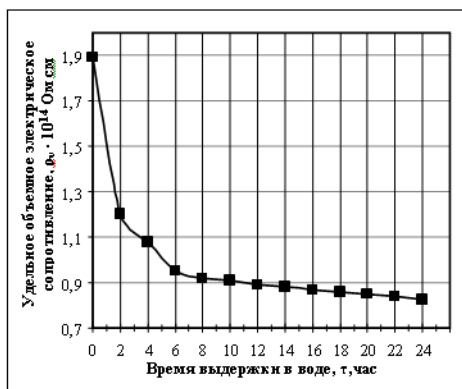


Рис. 2 – Зависимость удельного объемного электрического сопротивления от времени выдержки в воде при T = 293 К

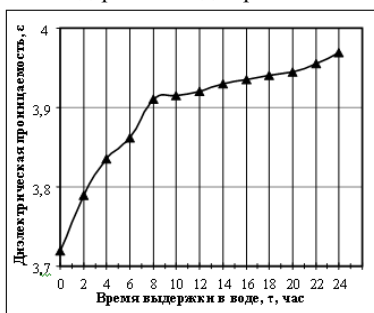


Рис. 3 – Зависимость диэлектрической проницаемости от времени выдержки в воде при T = 293 К

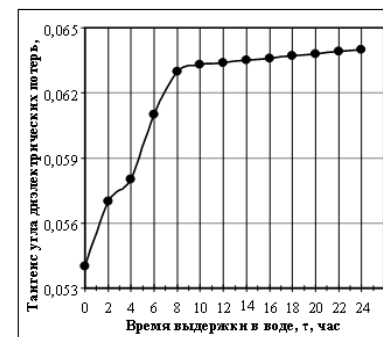


Рис. 4 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от времени выдержки в воде при T = 293 К

Анализ полученных результатов позволяет определить те участки на шкале времени, на которых наблюдается наиболее динамичное изменение электрофизических параметров. Наиболее выражено происходит снижение параметров  $\rho_v$  (удельное объемное электрическое сопротивление), а также рост параметра  $\text{tg}\delta$  (тангенс угла диэлектрических потерь) и  $\epsilon$  (диэлектрическая проницаемость), до 8 ч. пребывания в воде.

Дальнейший процесс выдержки образцов в воде мало влияет на изменение вышеуказанных характеристик полимерных композиций.

Данные исследований и проведенных расчетов подтверждаются высокими значениями корреляции вышеуказанных характеристик на всем участке времени  $|K| = [0,883; 0,981]$ .

Таким образом, разработанные композиции на основе ПВХ для изоляции силовых кабелей низкого напряжения имеют высокие технологические, физико-механические, а также электрофизические характеристики.

**Список литературы:** 1. Горение, деструкция и стабилизация полимеров под редакцией д-ра хим. наук Заикова Г. Е. НОТ. Санкт-Петербург, 2008; 2. Чулеева Е. В., Чулеев В. Л., Золотарев В. М., Василец Л. Г. Композиционные материалы на основе поливинилхлорида. Теплофизические, реологические и электрофизические свойства // Хімічна промисловість України. 2011., № 6., С 48–54; 3. ДСТУ EN 50363-3:2010 Матеріали для ізоляції, оболонки і зовнішніх покривів низьконапружних силових кабелів. Частина 3. ПВХ ізоляційні композиції (EN 50363-3:2005, IDT); 4. EN 50395:2005 Electrical test methods for low voltage energy cables; 5. Золотарев В. М., Чулеева Е. В., Чулеев В. Л. Регулирование свойств композиций на основе поливинилхлорида с использованием стабилизаторов, не содержащих свинец, для изоляции кабельной

продукции // Электротехника і електромеханіка. 2013., № 2013/4., С 54–59; 6. ГОСТ 5960-72 Пластикат поливинилхлоридный для изоляции и защитных оболочек проводов и кабелей. Технические условия; 7. ГОСТ 6433.1 – 71 (СТ СЭВ 2121-80) Материалы электроизоляционные твердые. Условия окружающей среды при нормализации, кондиционировании и испытании; 8. ГОСТ 6433.2 – 71 (СТ СЭВ 2121-80) Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрических сопротивлений при постоянном напряжении; 9. ГОСТ 6433.4 – 71 (СТ СЭВ 3164-80) Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при частоте 50 Гц.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gorenje, destrukcija i stabilizacija polimerov pod redakciej d-ra him. nauk Zaikova G. E. NOT. Sankt-Peterburg, 2008; 2. Chuleeva E. V., Chuleev V. L., Zolotarev V. M., Vasilec L. G. Kompozicionnye materialy na osnove polivinilhlorida. Teplofizicheskie, reologicheskie i jelektrofizicheskie svojstva. *Himichna promislovist' Ukraini*. 2011. No 6. 48–54 Print. 3. DSTU EN 50363-3:2010 Materiali dlja izoljacii, obolonok i zovnishnih pokriviv niz'konapruzhhnih silovih kabeliv. Chastina 3. PVH izoljacionni kompozicii (EN 50363-3:2005, IDT); 4. EN 50395:2005 Electrical test methods for low voltage energy cables; 5. Zolotarev V. M., Chuleeva E. V., Chuleev V. L. Regulirovanie svojstv kompozicij na osnove polivinilhlorida s ispol'zovaniem stabilizatorov, ne sodержashhijh svinec, dlja izoljacii kabel'noj produkcii. *Elektrotehnika i elektromehanika*. 2013. No 4. 54–59 Print. 6. ГОСТ 5960-72 Пластикат поливинилхлоридный для изоляции и защитных оболочек проводов и кабелей. Технические условия; 7. ГОСТ 6433.1 – 71 (СТ СЭВ 2121-80) Материалы электроизоляционные твердые. Условия окружающей среды при нормализации, кондиционировании и испытании; 8. ГОСТ 6433.2 – 71 (СТ СЭВ 2121-80) Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрических сопротивлений при постоянном напряжении; 9. ГОСТ 6433.4 – 71 (СТ СЭВ 3164-80) Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при частоте 50 Гц.

*Надійшла (received) 08.03.2014*

УДК 621.315

**Ю.Н.ШУМИЛОВ**, докт. техн. наук, проф., зам. директора ГП «НИИВН», Славянск

## **ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ВЫБОРА И ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

В статье показана необходимость корректировки действующей в Украине нормативной документации (НД), касающейся выбора и эксплуатации полимерной изоляции, в частности, по вопросу выбора длины пути утечки в загрязненных районах и по обновлению требований к испытательным напряжениям грозовой и коммутационного импульса. Рекомендуются в данной статье скорректированные импульсные испытательные напряжения, а также изоляционная длина полимерных изоляторов позволят обеспечить их более надежную работу в электрических сетях и повысить конкурентоспособность на внешнем и внутреннем рынках.

**Ключевые слова:** линейные полимерные изоляторы, нормативная документация, степень загрязнения атмосферы, длина пути утечки, испытательные напряжения, грозовой и коммутационный импульсы.

С момента внедрения первых промышленных партий полимерных изоляторов в Украине прошло 27 лет (с 1985 г.).

Накопленный за это время опыт эксплуатации выявил ряд проблемных вопросов в части их выбора и применения. Одним из таких вопросов является необходимость доработки и пересмотра ряда разделов нормативной документации. В настоящем докладе затронуты следующие вопросы:

1. О необходимости приведения в соответствие старых и новых норм по загрязнению атмосферы (СЗА и СЗ), прямым образом влияющих на выбор изоляции.
2. О необходимости корректировки импульсных разрядных напряжений.

Рассмотрим вкратце данные вопросы.

### **1. О необходимости приведения в соответствие старых и новых норм по загрязнению атмосферы**

Отправной точкой выбора внешней изоляции электрооборудования является определение степени загрязнения атмосферы (СЗА или СЗ) в месте расположения воздушной линии. Степени загрязнения определяют по картам уровней изоляции (региональным или локальным), составленным на основе натурных исследований и опыта эксплуатации. По установленной степени

© Ю. Н.Шумилов, 2014

загрязнения из таблиц находят нормированное значение удельной эффективной длины пути утечки  $\lambda_3$ , и далее рассчитывают геометрическую длину пути утечки изолятора.

Ситуация сложилась так, что в настоящее время по выбору изоляции ВЛ на территории Украины одновременно действуют два нормативных документа: ГKD 34.51.101-96 «Инструкция по выбору и эксплуатации внешней изоляции электроустановок 6-750 кВ на предприятиях Минэнерго Украины» и глава 1.9 «Внешняя изоляция электроустановок» ПУЭ:2006.

По условию работы изоляции в ГKD 34.51.101 установлено 7 степеней загрязнения атмосферы: I, II, III, IV, V, VI, VII, обозначаются СЗА.

Позднее в главе 1.9 ПУЭ устанавливается 5 степеней загрязнения атмосферы: 1, 2, 3, 4, 5, и обозначаются СЗ, причем соответствие между СЗА и СЗ до сих пор официально не узаконено.

Введение новой градации степеней загрязнения в главе 1.9 ПУЭ:2006 было обусловлено необходимостью гармонизации с действующими международными стандартами, в частности, с МЭК 815 «Руководство по выбору изоляторов в загрязненных районах», с российским изданием главы ПУЭ «Изоляция электроустановок», а также с ГОСТ 9920-89 «Электроустановки переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Длина пути утечки внешней изоляции», в которых нормируется 4 степени загрязнения атмосферы.

На основании вышеизложенного в главе «Внешняя изоляция электроустановок» также были приняты 4 зоны загрязнения атмосферы с удельной проводимостью слоя загрязнения 5; 10; 20; 30 мкСм. Кроме того, дополнительно была введена 5-я особая зона, соответствующая VII СЗА по ГKD 34.51.101.

Новым является и то, что в главе 1.9 ПУЭ:2006 для внешней изоляции ВЛ и внешней изоляции ОРУ приняты одинаковые нормированные значения удельной эффективной длины пути утечки  $\lambda_3$ , в то время как в ГKD 34.51.101 значения  $\lambda_3$  для ВЛ и ОРУ отличаются, причем в ГKD  $\lambda_3$  отличается также для ВЛ 110-220 кВ и ВЛ 330-750 кВ.

Действие двух документов с различными нормативными требованиями вызывает неопределенность и путаницу при выборе изоляции.

С целью исключения недоразумений при работе и выборе внешней изоляции вновь проектируемых электроустановок необходимо узаконить таблицу соотношений между характеристиками

СЗА, указанными в ГKD 34.51.101, и характеристиками СЗ, приведенными в главе 1.9 ПУЭ:2006.

ГП «НИИВН» рекомендует руководствоваться соотношениями, приведенными в табл. 1.

Таблица 1 – Соотношение степеней загрязнения атмосферы

Степень загрязнения атмосферы					
ГKD 34.51.101 -96			ПУЭ:2006, глава 1.9		
СЗ	$\lambda_3$ , см/кВ, не менее, при номинальном напряжении В ОРУ		СЗ	$\lambda_3$ , см/кВ, не менее, при номинальном напряжении В ОРУ	
	до 35 кВ включительно	110-750 кВ		до 35 кВ включительно	110-750 кВ
I	1,90	1,50	1	1,90	1,60
II	1,90	1,50			
III	2,25	1,80			
IV	2,60	2,25	2	2,35	2,00
V	3,10	2,60			
VI	3,50	3,10	4	3,50	3,10
VII	4,20	3,50			

Затем необходимо осуществить переработку ГKD 34.51.101, скоординировав его положения с соответствующими положениями главы 1.9 ПУЭ:2006.

При определении соответствия СЗА и СЗ рассматривался вопрос об отнесении IV СЗА ко второй либо третьей СЗ. При совместном обсуждении данного вопроса с энергопредприятиями, в частности, Донбассэнерго, было принято решение отнести IV СЗА к 2 СЗ.

Целесообразность принятого отнесения можно пояснить с помощью условной диаграммы количества линий, проходящих по загрязненным районам, рис. 1.

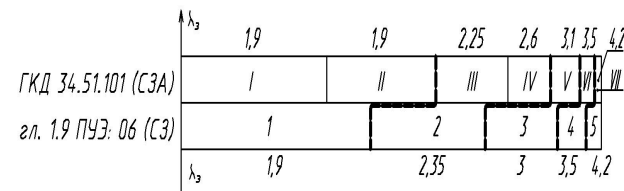


Рис. 1 Условная диаграмма количества воздушных линий (прямоугольники), проходящих по районам с различной степенью загрязнения

Из диаграммы следует, что количество участков линий, проходящих по загрязненным районам, значительно меньше, чем в относительно чистых районах, поэтому, перевод IV СЗА в третью СЗ, сопровождающееся значительным увеличением удельной эффективной длины пути утечки  $l_{\Sigma}$ , может привести к существенному удорожанию изоляции ВЛ. Наоборот, при переводе IV СЗА во вторую СЗ при относительно небольшом снижении  $l_{\Sigma}$  затраты снизятся. При этом по энергосистеме в целом такой перевод не отразится на удельном количестве отказов, поскольку произойдет выравнивание показателя за счет усиления изоляции III СЗА при переводе её во вторую СЗ.

Таблицу 1 необходимо официально узаконить, например, в подлежащем переработке ГКД 34.51.101.

Для большинства ныне действующих ВЛ и ОРУ СЗА и, соответственно, уровень изоляции были определены в 70-х – 80-х годах, и с тех пор не пересматривались. Поэтому для изоляции, имеющей к настоящему времени положительный опыт эксплуатации (количество перекрытий и повреждений изоляции меньше нормативного уровня и т.д.), и при отсутствии в данном районе новых источников загрязнения, приведение уровней изоляции в соответствие с нормами, регламентируемыми новой редакцией главы 1.9 ПУЭ, не требуется.

Вместе с тем, при плановой замене внешней изоляции (линейной, подстанционной) следует предусматривать меры по ее усилению до требуемого уровня, регламентируемого главой 1.9 ПУЭ. Если же это по каким-либо причинам не представляется возможным, то согласно разделу 1.9.22 ПУЭ должно быть предусмотрено проведение дополнительных профилактических мероприятий.

## 2. О необходимости корректировки импульсных испытательных напряжений

При анализе требований к испытательным напряжениям грозовых и коммутационных импульсов, заложенных в действующих стандартах на полимерные изоляторы - ГОСТ 28856 и СОУ МПЕ 40.1.51.301, обращает на себя внимание факт менее жестких требований по испытательным напряжениям по сравнению с аналогичной продукцией зарубежных фирм, рисунок 2; это создает ситуацию неконкурентоспособности полимерных изоляторов по сравнению с зарубежными, и может привести к снижению их надежности. Об этом уже указывалось в [1].

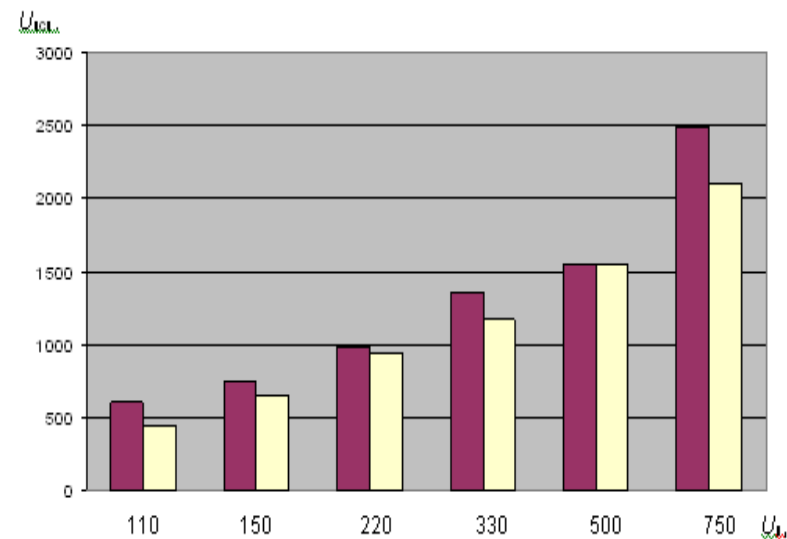


Рис. 2 Испытательные напряжения грозового импульса для полимерных изоляторов по зарубежным данным (затемнённые прямоугольники) и по ГОСТ 28856 и СОУ МПЕ 40.1.51.301

Экспериментальные данные об импульсных разрядных напряжениях изолирующих подвесок линейных изоляторов отрывочны и не систематизированы.

Для создания базы данных и систематизации разрядных напряжений для гирлянд тарельчатых и полимерных изоляторов в ГП «НИИВН» в разное время были проведены испытания подвесок импульсными напряжениями 1,2/50 мкс и 250/2500 мкс положительной и отрицательной полярности, в сухом состоянии и под дождем. При анализе результатов дополнительно использованы результаты испытаний, выполненные в ВЭИ [2].

Систематизация полученных результатов, по нашему мнению, может быть наилучшим образом представлена в виде эмпирических выражений  $U_{50\%} = f(l_{ин}, l_{ин})$ . В таблицах 2 и 3 приведены 50 %-ные разрядные напряжения гирлянд тарельчатых и полимерных изоляторов, выраженные в большинстве случаев в виде линейных функций от изоляционной длины гирлянды  $l_{ин}$  и изоляционной длины полимерного изолятора  $l_{ин}$ .

Таблица 2 – 50 %-ные разрядные напряжения для гирлянд стеклянных изоляторов (ПС 70Е, ПС 120Б)

Тип воздействия перенапряжения	50 %-ные разрядные напряжения для гирлянд стеклянных изоляторов				
	полярность импульса	в сухом состоянии	$\sigma$ , %	под дождем	$\sigma$ , %
Грозовые импульсы 1,2/5 мкс	+	$U_{50\%} = 38,6 + 525,4 \cdot \ell_{иг}$	3	–	–
	–	$U_{50\%} = 46,1 + 564 \cdot \ell_{иг}$	3	–	–
Коммутационные импульсы 250/2500 мкс	+	$U_{50\%} = 46,3 + 415,2 \cdot \ell_{иг}$	3–4	$U_{50\%} = 27 + 380 \cdot \ell_{иг}$	3–4
	–	$U_{50\%} = 138,7 + 532,5 \cdot \ell_{иг}$	2, 1–2, 3, 6	$U_{50\%} = -4,3 + 420,7 \cdot \ell_{иг} - 3,6 \cdot \ell_{иг}^2$	2, 1–2, 4

\* Функция  $U_{50\%}(\ell_{иг})$  имеет нелинейный характер.

Таблица 3 – 50 %-ные разрядные напряжения линейных стержневых полимерных изоляторов (ЛК 70, ЛК 120, ЛК 160)

Тип воздействия перенапряжений	50 %-ные разрядные напряжения для полимерных изоляторов, кВ				
	полярность импульса	в сухом состоянии	$\sigma$ , %	под дождем	$\sigma$ , %
Грозовые импульсы 1,2/5 мкс	+	$U_{50\%} = 90 + 520 \cdot \ell_{инп}$	2-3	$U_{50\%} = 90 + 520 \cdot \ell_{инп}$	–
	–	$U_{50\%} = 200 + 490 \cdot \ell_{инп}$	2-3	$U_{50\%} = 230 + 370 \cdot \ell_{инп}$	–
Коммутационные импульсы 250/2500 мкс	+	$*U_{50\%} = 1390 \cdot \ell_{инп}^{0,45} - 820$	6	$U_{50\%} = 140 + 400 \cdot \ell_{инп}$	6
	–	$U_{50\%} = 160 + 530 \cdot \ell_{инп}$	4-6	$U_{50\%} = 235 + 285 \cdot \ell_{инп}$	4–6

\* Функция  $U_{50\%}(\ell_{инп})$  имеет нелинейный характер.

Согласно [3, 4, 5] при грозовых перенапряжениях в силу их особой кратковременности (до  $10^{-4}$  секунд) увлажнение дождем не влияет на поверхностную электрическую прочность стеклянных гирлянд, поэтому строки 1 и 2 в колонках 5 и 6 таблицы 2 не заполнены.

В этом отношении отличаются полимерные изоляторы с силиконовыми ребрами. По причине высокой гидрофобности силиконовой резины влага при дожде собирается в капли, искажая электрическое поле на поверхности изолятора, что приводит к снижению мокроразрядных напряжений при коммутационных

импульсах отрицательной полярности, см. табл. 3. При положительной полярности импульса снижение разрядных напряжений под дождем менее выражено.

Представленные в таблицах 2 и 3 экспериментальные результаты позволяют путем простейших вычислений сопоставлять разрядные напряжения изоляторов любой изоляционной длины в зависимости от условий испытаний.

Пользуясь расчетными выражениями, приведенными в таблицах 2 и 3, для сравнения были вычислены 50 %-ные разрядные напряжения гирлянд стеклянных и полимерных изоляторов для двух характерных изоляционных длин: 1 м и 3 м и для различных условий испытания, табл. 4.

Таблица 4 – 50 %-ные разрядные напряжения полимерных изоляторов ЛК и гирлянд стеклянных изоляторов ПСД 70Е в зависимости от условий испытаний и длины подвески

Вид испытания	Полярность импульса	Состояние изолятора	Изоляционная длина 1 м		Изоляционная длина 3 м	
			полимерный изолятор	гирлянда	полимерный изолятор	гирлянда
Грозовой импульс 1,2/50 мкс	+	в сухом состоянии	610	564	1650	1615
	–	в сухом состоянии	690	610	1670	1738
	+	под дождем	610	564	1650	нет данные
	–	под дождем	600	610	1340	–
Коммутационный импульс 250/2500 мкс	+	в сухом состоянии	570	461	1459	1292
	–	в сухом состоянии	690	671	1750	1736
	+	под дождем	540	407	1340	1167
	–	под дождем	520	393	1090	1045

Из таблицы 4 следует:

1. При всех видах проведенных импульсных испытаний полимерные изоляторы одинаковой длины с гирляндами в большинстве случаев имеют более высокие значения разрядных напряжений.

2. При воздействии грозových импульсов отрицательной полярности под дождем происходит снижение разрядных напряжений, причём с ростом изоляционной длины изолятора снижение возрастает.

3. При воздействии коммутационных импульсов обеих полярностей под дождем происходит снижение разрядных напряжений, как у гирлянд, так и у полимерных изоляторов, причём при отрицательной полярности импульса наблюдается большее снижение разрядного напряжения, чем при положительной полярности.

4. Значительное снижение разрядных напряжений коммутационного импульса отрицательной полярности под дождем (до 60%) указывает на необходимость уточнения испытательных напряжений коммутационного импульса.

### 2.1 Испытательные напряжения коммутационных импульсов

В стандартах на полимерные изоляторы ГОСТ 28856-90 отсутствуют испытания коммутационным импульсом под дождем, а в СОУ МПЕ 40.1.51.301:204 значения испытательных напряжений под дождем заимствованы из ГОСТ 1516.3-96, который не распространяется на изоляцию линий электропередачи. В то же время, выявленное значительное снижение разрядных напряжений коммутационного импульса под дождем (см. таблицу 4) указывает на необходимость корректировки и введения в нормативную документацию испытаний данного типа.

Расчет необходимых испытательных напряжений коммутационного импульса производился по следующей методике. Первоначально определялось расчетное 50 %-ное напряжение отдельной подвески  $U_{50\%(1)}$ .

Согласно [5] для обеспечения требуемой надежности ВЛ расчетное 50 %-ное напряжение отдельной подвески  $U_{50\%(1)}$  при коммутационных импульсах должно быть не менее чем:

$$U_{50\%(1)} = \frac{K_{np} \cdot U_{np} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1-t(n) \cdot \sigma^*} \cdot \frac{1}{K_p}, \quad (1)$$

где  $K_{np}$  – расчётная кратность перенапряжений;

$\sigma^*$  – относительная величина среднеквадратичного отклонения разрядных напряжений линейной изоляции; при коммутационных импульсах под дождем  $\sigma^* \sim 0,06$ ;

$n$  – число одновременно установленных изоляционных подвесок на воздушной линии;  $t$  – относительная величина аргумента функции нормального распределения разрядных напряжений, обеспечивающая требуемую надежность изоляции ВЛ;

$K_p$  – коэффициент, учитывающий уменьшение электрической прочности изолятора на расчетной высоте установки ВЛ,  $K_p = 0,95$ .

После определения  $U_{50\%(1)}$  вычислялось требуемое выдерживаемое (испытательное) напряжение по известному выражению, приведённому в ГОСТ 1516.2:

$$U_{исп.к.} = U_{50\%(1)} \cdot (1-1,3 \cdot \sigma^*),$$

В выражении (1) первый множитель представляет собой расчетную амплитуду коммутационных импульсов при нормированных кратностях перенапряжений:

$$U_{к.п.} = \frac{K_{np} \cdot U_{np} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

Второй множитель в формуле (1) представляет статистический коэффициент запаса разрядного напряжения, учитывающий допустимое число перекрытий изоляции при коммутационных перенапряжениях (0,1 перекрытие в год на 100 км ВЛ), число изоляторов на ВЛ, количество опасных увлажнений в течение года и другие неблагоприятные факторы, влияющие на электрическую прочность изолятора:

$$K_3 = \frac{1}{1-t(n) \cdot \sigma^*} \cdot \frac{1}{K_p}$$

Многочисленными исследованиями и технико-экономическими расчетами показано, что коэффициент запаса  $K_3$  для изоляции ВЛ 110-750 кВ при коммутационных перенапряжениях может быть принят в зависимости от величины  $U_n$  в пределах 1,3 ÷ 1,4 [5].

Таким образом, расчётную величину требуемых разрядных напряжений отдельных изоляторов, установленных на каждый класс напряжения ВЛ, определяли как:

$$U_{50\%(1)} = U_{к.п.} \cdot K_3$$

Экспериментальное значение  $U_{50\%(1)}$  под дождем при отрицательной полярности импульса в зависимости от изоляционной длины  $l_{инп}$  определяли из эмпирического выражения, полученного опытным путем:

$$U_{50\%(1)} = 235 + 285 \cdot l_{инп}, \quad (2)$$

В таблице 5 приведены расчетные и экспериментальные значения  $U_{50\%(1)}$  для полимерных изоляторов (под дождем, импульс отрицательной полярности с формой волны 250/2500 мкс), а также выдерживаемые (испытательные) значения коммутационного импульса при этих же видах воздействий.

Таблица 5 - Расчетные и экспериментальные значения  $U_{50\%(1)}$  для полимерных изоляторов (под дождем, отрицательная полярность импульса 250/2500 мкс)

$U_n$ , кВ <sub>д</sub>	35	110	150	220	330	500	750
$U_{нр}$ , кВ <sub>д</sub>	40,5	126	172	252	363	525	787
Минимальная изоляционная длина стандартных полимерных изоляторов $\ell_{инп}$ , м	0,4	1,0	1,3	1,8	2,6	3,5	5,4
$K_{нр}$	3,5	3,1	3,0	3,0	2,7	2,5	2,1
$K_3$	1,31	1,31	1,31	1,31	1,35	1,31	1,39
$U_{к.п.}$ , кВ <sub>max</sub>	115,7	319,0	421,3	617,3	800,2	1071,6	1349,4
$U_{50\%(1)}$ , кВ <sub>max</sub> , расчетное значение (требуемое)	159,7	417,8	551,8	808,6	1080,3	1403,7	1875,7
$U_{50\%(1)}$ , кВ <sub>max</sub> , экспериментальное значение	349,0	520,0	605,5	748,0	976,0	1147,0	1774,0
Требуемое расчетное минимальное значение $\ell_{инп}$ по условию коммутационных перенапряжений (в знаменателе - округленное значение)	$\frac{0,4}{0,4}$	$\frac{0,67}{0,70}$	$\frac{1,21}{1,2}$	$\frac{2,01}{2,1}$	$\frac{2,96}{3,0}$	$\frac{4,1}{4,1}$	$\frac{5,75}{5,8}$
Предлагаемая величина $U_{исп.к.п.}$ под дождем, отрицательная полярность импульса, кВ <sub>max</sub> знаменателе - округленное значение	-	-	-	$\frac{745,5}{750}$	$\frac{996}{1000}$	$\frac{1294}{1300}$	$\frac{1729,4}{1800}$
$U_{исп.к.п.}$ по СОУ МПЕ 40.1.51.301, кВ	-	-	-	620	950	1230	1550

Из таблицы 5 следует, что начиная с напряжения 220 кВ, расчетные требуемые значения разрядных напряжений линейной изоляции при воздействии коммутационных импульсов превышают фактические разрядные напряжения под дождем выпускаемых полимерных изоляторов стандартной длины. Отсюда следует

необходимость увеличения изоляционной длины полимерных изоляторов напряжением 220 кВ и более. Выводы по данному разделу:

1. В перечень нормированных испытательных напряжений полимерных изоляторов, начиная с 220 кВ и выше, необходимо включить испытания коммутационным импульсом положительной и отрицательной полярности под дождем, при этом испытательные напряжения рекомендуется принять, как указано в предпоследней строке табл. 5 (округлённые значения).

2. Минимальные значения изоляционной длины  $\ell_{инп}$  для изоляторов 220 кВ и выше необходимо увеличить до расчетных значений, указанных в таблице 5, строка 9.

## 2.2 Испытательные напряжения грозовых импульсов

По правилам координации испытательные напряжения грозовых импульсов должны быть скоординированы с испытательными напряжениями коммутационных импульсов. Координация импульсных испытательных напряжений может быть осуществлена следующим образом. Если в полученное ранее эмпирическое выражение для 50 %-ного разрядного напряжения грозовых импульсов ( $U_{50\%г} = 90 + 520 \cdot \ell_{инп}$ , таблица 3) подставить значения  $\ell_{инп}$ , определённые по условию надёжной работы под дождем при коммутационных импульсах, мы получим скоординированные значения испытательных напряжений грозового импульса. Испытательные выдерживаемые напряжения грозового импульса в этом случае определяются как:

$$U_{выд.} = U_{50\%г} \times (1 - t \cdot \sigma^*),$$

где  $\sigma^*$  для грозового импульса с формой волны 1,2/50 мкс принимается равной 0,03.

В таблице 6 приведен расчет испытательных напряжений для полимерных изоляторов для классов напряжения 110-750 кВ.

Таблица 6 – Расчетные значения испытательных напряжений грозовых импульсов для полимерных изоляторов

$U_n$ , кВ	110	150	220	330	500	750
$\ell_{инп}^*$ , м	1,0	1,3	2,1	3,0	4,1	5,8
$U_{50\%г}$ , кВ, 1,2 мкс	610	766	1182	1650	2222	3106
$U_{исп.к.п.}^{**}$ , кВ, 1,2/50 мкс	$\frac{586,2}{590}$	$\frac{736}{740}$	$\frac{1135}{1200}$	$\frac{1586,6}{1600}$	$\frac{2135,3}{2200}$	$\frac{2984,8}{3000}$
$U_{исп.к.п.}$ , кВ, по СОУ МПЕ 40.1.51.301	450	650	950	1175	1550	2100

\* скорректированные в соответствии с табл. 5 номинальные значения  $\ell_{инп}$  по условию коммутационных перенапряжений.

\*\* в числителе приведены расчетные значения, в знаменателе – рекомендуемые.



Из таблицы 6 видно, что расчетные значения  $U_{исп.}$  практически полностью совпадают с испытательными напряжениями по каталогам зарубежных фирм.

#### **Заключение**

Рекомендуемые в данной статье скорректированные импульсные испытательные напряжения, а также изоляционные длины полимерных изоляторов позволяют обеспечить их более надёжную работу в электрических сетях и повысить конкурентоспособность на внешнем и внутреннем рынках.

**Список литературы:** 1. Волкова О.В. Электрическая прочность линейных полимерных изоляторов для линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения. Электрическая прочность внешней изоляции. Труды ВЭИ / О.В. Волкова, В.В. Годулян, А.Р. Корявин. - М.: «Знак», 2006. – 387 с. 2. Корявин А.Р. Волкова О.В. Импульсная электрическая прочность полимерных линейных изоляторов в сухом состоянии и при дожде / А.Р. Корявин, О.В. Волкова // Электротехника.- № 03/01, 2001. 3. Бидашко Г.Б. Разрядные характеристики стержневых полимерных изоляторов для воздушных линий 110-750 кВ. – Изоляция воздушных линий электропередачи 110-750 кВ. / Г.Б. Бидашко, Д.Г. Колкер, В.Н. Соломатов, Ю.Н. Яшин // Сборник научных трудов НИИПТ, 1989, С. 97-104. 4. Техника высоких напряжений : Учебник для вузов / Под ред. Г.С.Кучинского.- СПб.: Энергоатомиздат, 2003.- 608 с. 5. Александров Г.Н., Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, В.Е. Кизяветтер.- Энергия, ЛО, 1969.

**Bibliography (transliterated):** 1. Volkova O.V. Goduljan, V.V. Korjavin A.R. Jelektricheskaja prochnost' linejnyh polimernyh izoljatorov dlja linij jelektrperedachi vysokogo i sverhvyssokogo naprjazhenija. Jelektricheskaja prochnost' vneshnej izoljacji. Trudy VJel. Moscow: «Znak», 2006. 2. Korjavin A.R. Volkova O.V. Impul'snaja jelektricheskaja prochnost' polimernyh linejnyh izoljatorov v suhom sostojanii i pri dozhde / A.R. Korjavin, O.V. Volkova // Jelektrotehnika.- № 03/01, 2001. 3. Bidashko G.B. Razrjadnye harakteristiki stержnevyyh polimernyh izoljatorov dlja vozdushnyh linij 110-750 kV. – Izoljacija vozdushnyh linij jelektrperedachi 110-750 kV. / G.B. Bidashko, D.G. Kolker, V.N. Solomatov, Ju.N. Jashin // Sbornik nauchnyh trudov NIIPТ, 1989, S. 97-104. 4. Tehnika vysokih naprjazhenij : Uchebnik dlja vuzov Pod red. G.S.Kuchinskogo.- SPb.: Energoatomizdat. 2003. 5. Aleksandrov G.N., Ivanov V.L., Kizjavetter V.E. Jelektricheskaja prochnost' naruzhnoj vysokovol'tnoj izoljacji. Jenergija. LO, 1969.

*Надійшла (received) 12.14.2013*

УДК 621.314

**О. В. ШУТЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;  
**Д. М. БАКЛАЙ**, аспірант, НТУ «ХПІ»;

### **АНАЛІЗ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ КОНЦЕНТРАЦІЙ ГАЗІВ, РОЗЧИНЕНИХ У МАСЛІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ВИКОНАННЯ**

Запропоновано алгоритм статистичної обробки результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів, для формування масивів з однорідними концентраціями в умовах апіорної невизначеності вхідної, вимірювальної інформації. Виконані дослідження законів розподілу газів розчинених у маслі бездефектних і дефектних трансформаторів. Установлено, що щільності розподілів для дефектних і бездефектних станів перетинаються, а це значить що принципово не можливо вибрати граничні значення показників, які б не давали помилкових рішень.

**Ключові слова:** хроматографічний аналіз, дефект що розвивається, статистична обробка, закони розподілу, критерії згоди.

**Постановка проблеми.** Одним з первинних ознак наявності дефекту, що розвивається, у силових трансформаторах, може бути перевищення концентрацій газів, деяких значень, названих граничними. Очевидно, що надійність роботи устаткування буде багато в чому залежати від того наскільки коректно обрані граничні значення концентрацій розчинених у маслі газів. Відповідно діючому в Україні нормативному документу [1], граничні значення визначаються на основі аналізу інтегральних функцій розподілу концентрацій газів, отриманих для 90% усіх вимірів у бездефектних трансформаторах. Однак у такий спосіб можна визначити типові концентрації газів, тобто максимальні концентрації газів, які можуть бути виявлені у 90 – 95% устаткування від загальної кількості, що не має ознак дефектів. Дане обмеження є довільним і пов'язане з тим, що згідно із середньосвітовою статистикою тільки у 5–10% устаткування можуть бути відхилення, що приводять до розвитку дефектів. У деяких методичних керівних документах типові значення ототожнюються із граничними концентраціями газів, що розділяють бездефектне й дефектне устаткування. Така інтерпретація, [2], є помилковою. На підставі тільки статистичного аналізу навіть дуже великої кількості результатів ХАРГ, отриманих від устаткування, що не має дефектів не можна визначити граничні показники дефектного стану через багатofакторність процесів газоутворення.

© О. В. Шутенко, Д. М. Баклай, 2014

У теорії технічної діагностики [3] граничні значення ознак визначаються на основі аналізу статистичних розподілів діагностичних ознак не тільки для бездефектних, але й дефектних об'єктів.

В зв'язку з цим дослідження й аналіз законів розподілу газів, розчинених у маслі високовольтних силових трансформаторів, є актуальною й практично значимою задачею.

**Аналіз публікацій.** У цей час питанням, пов'язаним з дослідженням законів розподілу газів, розчинених у маслі високовольтного електроенергетичного устаткування, присвячено кілька публікацій. У роботі [4] на основі аналізу результатів хроматографічного аналізу розчинених газів у маслі високовольтних вводів 110-500 кВ, було встановлено, що по виду розподілу, гази можна розділити на дві групи: перша -  $H_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ; друга -  $CO$ ,  $CO_2$ . Огибаюча гістограми розподілу першої групи описується виразом:

$$F = \frac{A^2 \cdot x \cdot e^{-A \cdot x}}{Q} \quad (1)$$

Функція розподілу вуглеводнів описується виразом:

$$F = \frac{A^4 \cdot x^2 \cdot e^{-A \cdot x}}{Q}, \quad (2)$$

де:  $A$  – коефіцієнт, що задає форму,  $Q$  – коефіцієнт масштабування,  $x$  – значення аналізованого газу.

У роботі [5] вирази (1) і (2) використані для опису розподілів концентрацій газів, розчинених у маслі силових трансформаторів, напругою 35 кВ. У той же час у роботі [6], вказується, що концентрації газів (зокрема оксиду вуглецю) для трансформаторів напругою 110-220 кВ, мають ранговий розподіл. А в роботі [7] для апроксимації концентрацій газів використаний розподіл експонентного типу:

$$p(x) = \frac{\alpha}{2\sigma\lambda\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \cdot e^{-\left|\frac{x-m}{\sigma\lambda}\right|^\alpha}, \quad (3)$$

де:  $x_i$  – поточне значення змінної;  $m$  – оцінка математичного очікування;  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення;  $\alpha$  – параметр

розподілу;  $\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)$  – гамма-функція від аргументу  $\frac{1}{\alpha}$ ;  $\lambda = \sqrt{\frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{\alpha}\right)}}$ ;

Враховуючи суперечливість результатів, наведених у відкритих джерелах, питання оцінки законів розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі високовольтних силових трансформаторів, вимагає додаткових досліджень.

**Ціль статті.** У статті наведені результати аналізу законів розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі як, бездефектних трансформаторів, так і трансформаторів у яких виявлені дефекти.

**Статистична обробка результатів експлуатаційних випробувань.** Для дослідження законів розподілу концентрацій розчинених у маслі газів, використовувалися результати хроматографічного аналізу по Донецькій, Луганській, Полтавській, Сумській, Харківській областям, України. Усього проаналізовано результати спостережень по 426 трансформаторам, негерметичного виконання, напругою 110 і 330 кВ загальним обсягом 54658 значень. Отримані в результаті експлуатаційного контролю дані, є статистично неоднорідними, оскільки, аналізовані трансформатори експлуатуються в різних умовах, мають відмінності в сортах масла, що заливається, різні значення завантаження, різний ступінь впливу аварійних режимів роботи мережі і т.д. Усе це приводить до того, що значення концентрацій газів у різних трансформаторах можуть суттєво різнитися.

Наявність неоднорідності в масивах вихідних даних не дозволяє одержати коректні функції щільності законів розподілу (див. рис. 1). У зв'язку, із чим виникає об'єктивна необхідність у розробці алгоритму для попередньої статистичної обробки вихідних даних. Як показав аналіз для більшості газів вуглеводневого ряду, розчинених у маслі трансформаторів негерметичного виконання, при відсутності дефектів, гістограми емпіричного розподілу мають вигляд аналогічний рис. 1. Іншими словами найбільшу ймовірність появи мають концентрації газів рівні нулю. Слід розуміти що, відсутність газу або нульове значення концентрацій є умовністю, а насправді розчинені в маслі гази присутні, просто їх концентрація нижче межі виявлення використовуюваного хроматографа.

У роботі [5] пропонується замінити значення нульових концентрацій значенням нижньої межі хроматографа. Однак, така заміна принципово не змінить форму емпіричного розподілу. Крім того значення реальних концентрацій можуть значно відрізнятися від значення нижньої межі хроматографа. Оскільки, для визначення граничних концентрацій розчинених у маслі газів область мінімальних концентрацій становить незначний інтерес, у порівнянні з областю високих значень концентрацій (необхідно виявити можливу область перетинання для бездефектного й дефектного станів), то при дослідженні законів розподілу «нульові концентрації» не враховувалися.

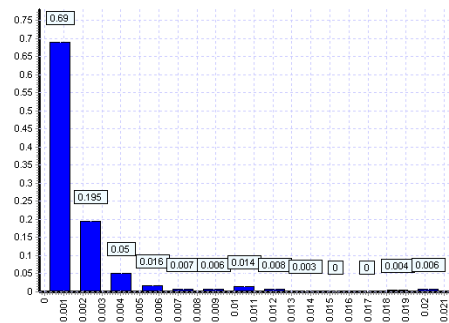


Рис. 1 – Гістограми емпіричного розподілу концентрацій етилену в маслі для масиву вихідних даних

Виконаний аналіз показав, що значення концентрацій того самого газу, для того самого трансформатора, отримані в різні моменти часу можуть відрізнятися на кілька порядків. У зв'язку із цим загальний алгоритм формування масивів однорідних даних був розбитий на два етапи. На першому етапі були виділені однорідні значення концентрацій газів у кожному окремому трансформаторі. На другому етапі були сформовані однорідні масиви по кожному з газів. Для виділення однорідних концентрацій газів у кожному окремому трансформаторі був використаний підхід, заснований на виділенні грубих промахів із числа однотипних вимірів. Враховуючи, що вид закону розподілу невідомий і судячи з літературної інформації, відмінний від нормального, то для виділення грубих промахів, був використаний статистичний критерій Ірвіна [8].

Результати тестування ілюструє рис. 2, на якому наведена залежність вмісту в маслі метану від тривалості експлуатації для

автотрансформатора ПС «Лозова» АТ-2 АТДЦТН-200/330 Північної енергетичної системи, для вихідних даних (рис. 2. а) і після обробки (рис. 2. б). Як видно з рисунка використання критерію Ірвіна дозволяє суттєво знизити неоднорідність результатів випробувань.

Формування масивів з однорідними концентраціями газів виконувалося з використанням трьох статистичних критеріїв [9]:

1). Ранговий непараметричний критерій Уїлкоксона ( $W$ ) – для перевірки статистичної гіпотези про схожість законів розподілу двох незалежних вибірок;

2).  $Z$  критерій ( $Z$ ) – для перевірки статистичної гіпотези про рівність математичних очікувань двох незалежних вибірок;

3). Критерій Фішера-Снедекора ( $F$ ) для перевірки статистичної гіпотези про рівність дисперсій двох незалежних вибірок.

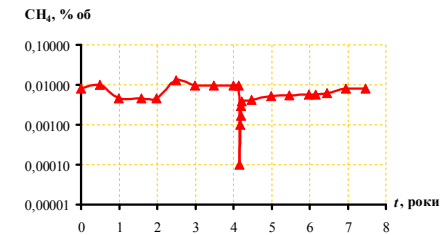
Дві незалежні вибірки вважалися однорідними, якщо за результатами тестування статистичні гіпотези:

про схожість законів розподілу двох незалежних вибірок;

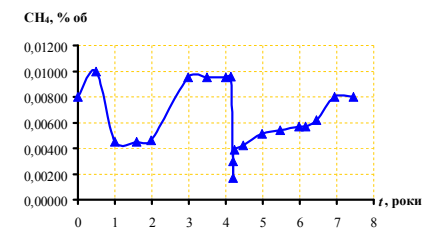
про рівність математичних очікувань двох незалежних вибірок;

про рівність дисперсій двох незалежних вибірок не відкидалися

при заданому рівні значимості  $\alpha = 0,05$ .



а



б

Рис. 2 – Залежність вмісту в маслі метану від тривалості експлуатації для автотрансформатора ПС «Лозова» АТ-2 АТДЦТН-200/330 Північної енергетичної системи: а – вихідні дані; б – після обробки критерієм Ірвіна.

Результати тестування ілюструє рисунок 3, на якому наведені залежності вмісту в маслі метану від тривалості експлуатації, для вихідного масиву даних (3 а) і отримані в результаті обробки (3 б). Порівнюючи рисунки 3 а й б легко побачити, що в результаті статистичної обробки неоднорідність, результатів ХАРГ значно знижується.

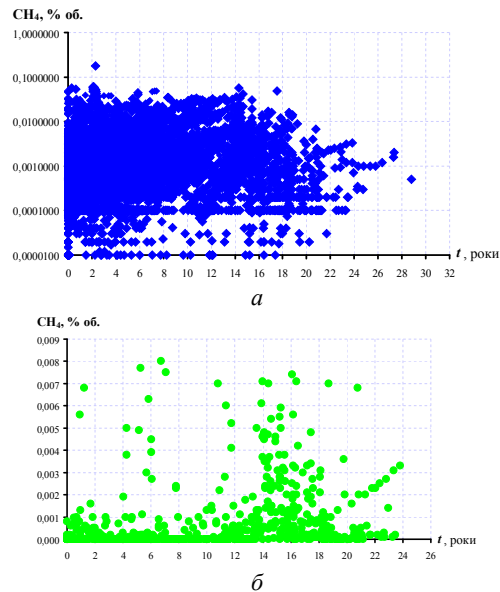


Рис. 3 – Залежність вмісту в маслі метану від тривалості експлуатації: а – вихідні дані; б – після статистичної обробки.

**Дослідження законів розподілу газів у бездефектних трансформаторах.** У результаті виконаного тестування по кожному з газів були сформовано кілька масивів однорідних концентрацій газів, що дозволило виконати оцінку законів розподілу по кожному з них. Для скорочення обсягу матеріалу в статті наведені характеристики однорідних масивів з мінімальними й максимальними значеннями швидкостей наростання газів, проміжні значення не приводяться. Обсяг вибіркового значень  $N$ , значення вибіркового середнього  $M_x$ , вибіркової дисперсії  $D_x$ , а також коефіцієнтів асиметрії й ексцесу  $j_a$  і  $j_e$

для даних з однорідних масивів, з мінімальними (М1) і максимальними (М2) концентраціями наведені в табл. 1.

Як видно з таблиці значення вибіркового середнього для тих самих газів, у різних масивах значимо відрізняються, що свідчить про різні умови, у яких експлуатувалися досліджувані трансформатори. Усі без винятку масиви даних мають позитивне значення коефіцієнта ексцесу, що говорить про те, що крива розподілу має більш високу й «гостру» вершину, ніж крива нормального закону. У той же час коефіцієнт асиметрії розподілів має як позитивні, так і негативні значення. Позитивне значення коефіцієнта асиметрії свідчить про те, що «довга частина» кривої розподілу розташована праворуч від математичного очікування, при негативному значенні коефіцієнта асиметрії «довга частина» кривої розподілу розташований ліворуч.

Таблиця 1 – Статистичні характеристики однорідних масивів розчинених у маслі газів

Газ	Масив	$N$	$M_x$	$D_x$	$j_a$	$j_e$
CH <sub>4</sub>	М1	749	0,001787	0,000001	0,859882	4,086394
	М2	114	0,006081	0,000008	0,406340	3,478714
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	М1	105	0,005734	0,000003	-0,26606	2,581705
	М2	139	0,016447	0,000073	0,321062	2,700014
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	М1	374	0,000400	0,000001	0,267044	3,270485
	М2	115	0,008508	0,000009	0,231670	3,009867
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	М1	220	0,000430	0,0000001	-0,03091	2,955332
	М2	621	0,000508	0,0000001	0,421933	3,626950
H <sub>2</sub>	М1	368	0,000167	0,000000	0,838634	3,765743
	М2	124	0,004404	0,000004	0,378305	3,169493
CO	М1	644	0,003914	0,000003	0,474578	3,011045
	М2	606	0,009667	0,000012	0,365192	3,177988
CO <sub>2</sub>	М1	944	0,045001	0,000537	0,627713	3,392695
	М2	896	0,116301	0,003507	0,439919	2,809543
N <sub>2</sub>	М1	249	2,648796	1,616153	0,984917	3,707773
	М2	585	12,722501	4,765405	0,152636	3,312872
O <sub>2</sub>	М1	259	3,069082	0,943027	0,103397	3,711135
	М2	898	4,537143	1,969509	0,499289	4,113706

Побудова гістограм емпіричного розподілу, оцінка параметрів 18 відомих законів розподілу, розрахунки значень критеріїв згоди ( $\chi^2$  Пірсона й критерію Колмогорова-Смірнова) виконувалися за допомогою, розробленої на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХПІ» програми «ZR» [9]. За результатами аналізу виконаного за допомогою програми «ZR» вдалося встановити, що розподіл

концентрацій газів, розчинених у маслі трансформаторів, що не мають дефектів, підкоряється закону розподілу Вейбулла, із щільністю:

$$p(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} \cdot x^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (4)$$

де:  $\alpha, \beta$  – параметри закону розподілу, що інтерпретуються відповідно як параметр масштабу й параметр форми.

Значення параметрів розподілу  $\alpha$  і  $\beta$ , критеріїв згоди  $\chi^2$  і критерію Колмогорова-Смірнова наведені в табл. 2. Як видно з таблиці для всіх масивів даних і розрахункові значення критерію згоди Пірсона й критерію Колмогорова-Смірнова не перевищують критичних значень, на підставі чого можна зробити висновок про те, що немає підстав для того, щоб відкинути гіпотезу про прийнятність закону розподілу Вейбулла. Гістограми емпіричного розподілу й функції щільності розподілу Вейбулла для однорідних підмножин газів, розчинених у маслі бездефектних трансформаторів, наведено на рисунку 4 та 5.

Таблиця 2 – Значення параметрів закону розподілу Вейбулла а також розрахункові й критичні значення (при  $\alpha=0,05$ ) критеріїв Пірсона й Колмогорова-Смірнова для однорідних підмножин газів, розчинених у маслі бездефектних трансформаторів

Газ	Масив	Параметри закону розподілу		Значення критерію Пірсона			Значення критерію Колмогорова-Смірнова	
		$\alpha$	$\beta$	$f$	$\chi^2_{расч}$	$\chi^2_{крит}$	$\lambda_{расч}$	$\lambda_{крит}$
CH <sub>4</sub>	M1	0,001989	1,54227	6	10,877	12,60	0,7404	1,360
	M2	0,006866	2,25528	4	6,7478	9,49	0,9142	1,360
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	M1	0,006313	4,02688	3	3,8636	7,82	0,5912	1,360
	M2	0,018570	1,98983	4	1,2375	9,49	0,2962	1,360
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	M1	0,000444	3,41316	4	7,9233	9,49	0,5648	1,360
	M2	0,009516	3,00048	3	4,0364	7,82	0,5370	1,360
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	M1	0,000470	4,42029	2	5,0430	5,99	0,6118	1,360
	M2	0,000573	2,22434	2	7,3878	7,82	0,7156	1,360
H <sub>2</sub>	M1	0,000188	1,89445	5	9,6103	11,10	0,6968	1,360
	M2	0,004968	2,36394	4	1,3976	9,49	0,3394	1,360
CO	M1	0,004416	2,36833	5	7,0255	11,10	0,6510	1,360
	M2	0,010804	3,04655	6	9,7422	12,60	0,7756	1,360
CO <sub>2</sub>	M1	0,050823	2,02699	8	8,0402	15,50	0,3754	1,360
	M2	0,131360	2,05227	12	17,464	21,00	0,4656	1,360
N <sub>2</sub>	M1	2,991637	2,18549	5	8,4480	11,10	0,8743	1,360
	M2	13,60117	6,83962	5	10,990	11,10	1,2698	1,360
O <sub>2</sub>	M1	3,406234	3,48529	3	4,3127	7,82	0,6849	1,360
	M2	5,027787	3,58451	7	14,009	14,1	1,0978	1,360

Отримані відмінності між отриманими авторами законами розподілу, і розподілами, які наведені у відкритих джерелах [5, 6, 7]

можуть бути пояснені різними методами статистичної обробки, які використовували дослідники при формуванні однорідних масивів даних. Так судячи з матеріалів, викладених в [6], попередня обробка даних не використовувалася, тому був використаний ранговий розподіл, який має вигляд, схожий з рис. 1. При формуванні масивів з однорідними концентраціями в [5], був використаний тільки статистичний критерій на рівність математичних очікувань. Наведені автором розподіли концентрацій газів мають форму, схожу на розподіл Вейбулла. А в роботі [7] масиви з однорідними концентраціями формувалися на основі аналізу факторів, що впливають на зміни концентрацій газів.

**Дослідження законів розподілу газів у дефектних трансформаторах.** При оцінці законів розподілу концентрацій газів для дефектних трансформаторів, принципово враховувати характер дефекту, що вимагає наявності великого обсягу результатів ХАРГ із чітко встановленим типом дефекту. На жаль, обмежений обсяг таких даних, не дозволив виконати більш ретельну оцінку законів розподілу, газів у трансформаторах, що мають дефект. При формуванні однорідних вибірок для дефектних трансформаторів, відбиралися тільки ті гази, які є ключовими для даного типу дефекту. Статистичні характеристики масивів газів для дефектних трансформаторів наведено в таблиці 3.

Як видно з таблиці 3 статистичні характеристики масивів газів, для дефектних трансформаторів, практично не відрізняються від параметрів розподілів отриманих для бездефектних трансформаторів. Позитивні значення коефіцієнтів асиметрії й ексцесу свідчать про відмінність досліджуваних законів розподілів від нормального. Трохи менші значення коефіцієнтів асиметрії для масивів дефектних трансформаторів, що свідчать про більш симетричну форму розподілу, можуть бути обумовлені невеликим обсягом вибірових значень.

Таблиця 3 – Статистичні характеристики однорідних масивів концентрацій газів для дефектних трансформаторів

Газ	$N$	$M_x$	$D_x$	$j_a$	$j_e$
CH <sub>4</sub>	54	0,036865	0,000303	0,487109	3,150885
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	67	0,058117	0,000809	0,527678	3,669434
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	44	0,027432	0,000139	1,071759	4,291861
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	53	0,017286	0,000099	0,840056	4,037096
H <sub>2</sub>	47	0,000627	0,000000	0,174890	2,969487

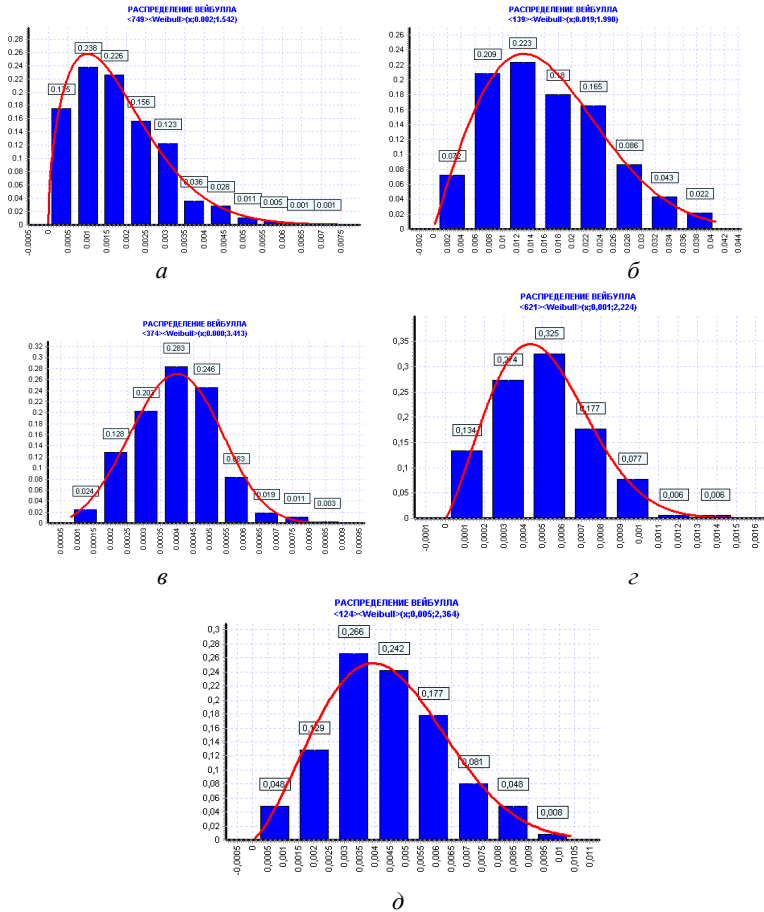


Рис. 4 – Гістограми емпіричного розподілу й функції щільності розподілу Вейбулла для однорідних підмножин газів, розчинених у маслі бездефектних трансформаторів: а – зміст метану; б – зміст етилену; в – зміст етану; г – зміст ацетилену; д – зміст водню.

Значення параметрів закону розподілу Вейбулла а також розрахункові й критичні значення (при  $\alpha=0,05$ ) критеріїв Пірсона й Колмогорова-Смирнова для концентрацій п'яти газів наведено в таблиці 4.

На рисунку 6 наведені гістограми емпіричного розподілу й функція щільності розподілу законів Вейбулла для п'яти газів

вуглеводневого ряду й водню, які є визначальними при розпізнаванні дефекту.

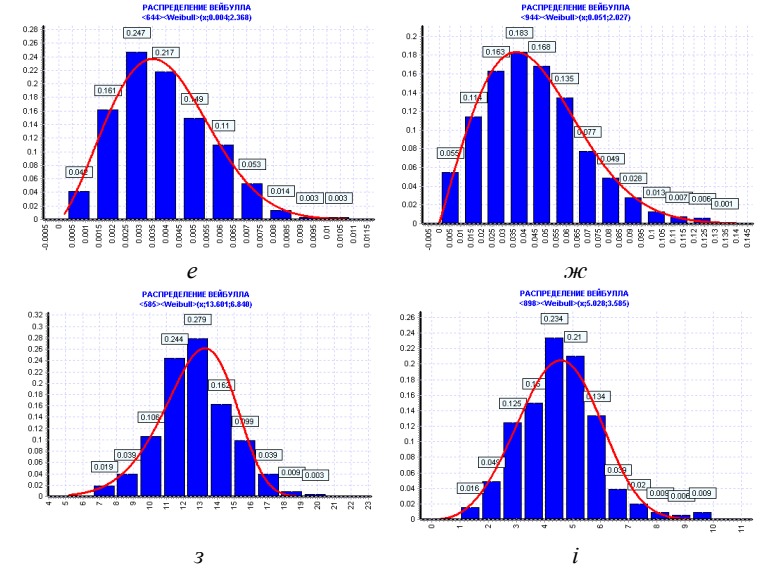


Рис. 5 – Гістограми емпіричного розподілу й функції щільності розподілу Вейбулла для однорідних підмножин газів, розчинених у маслі бездефектних трансформаторів: е – зміст оксиду вуглецю; ж – зміст діоксиду вуглецю; з – зміст азоту; і – зміст кисню.

Таблиця 4 – Значення параметрів закону розподілу Вейбулла а також розрахункові й критичні значення (при  $\alpha=0,05$ ) критеріїв Пірсона й Колмогорова-Смирнова для газів у дефектних трансформаторах

Газ	Параметри закону розподілу		Значення критерію Пірсона		Значення критерію Колмогорова-Смирнова		
	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$	$\chi^2_{роз.}$	$\lambda_{крит.}$	$\chi^2_{крит.}$	
CH <sub>4</sub>	0,041635	2,194290	2	0,7309	5,990	0,29950	1,360
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,065647	2,115252	2	0,7636	5,990	0,24242	1,360
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,030929	2,421890	1	0,4550	3,840	0,23414	1,360
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,019442	1,761373	1	1,8212	3,840	0,43029	1,360
H <sub>2</sub>	0,055464	2,503356	2	1,2793	5,990	0,35642	1,360

Аналізуючи дані табл. 4 і рис. 6 легко побачити, що для всіх п'яти газів розрахункові значення критерію згоди Пірсона й критерію

Колмогорова-Смірнова не перевищують критичних значень. На підставі чого можна зробити висновок про те, що немає підстав для того, щоб відкинути гіпотезу про прийнятність закону розподілу Вейбулла.

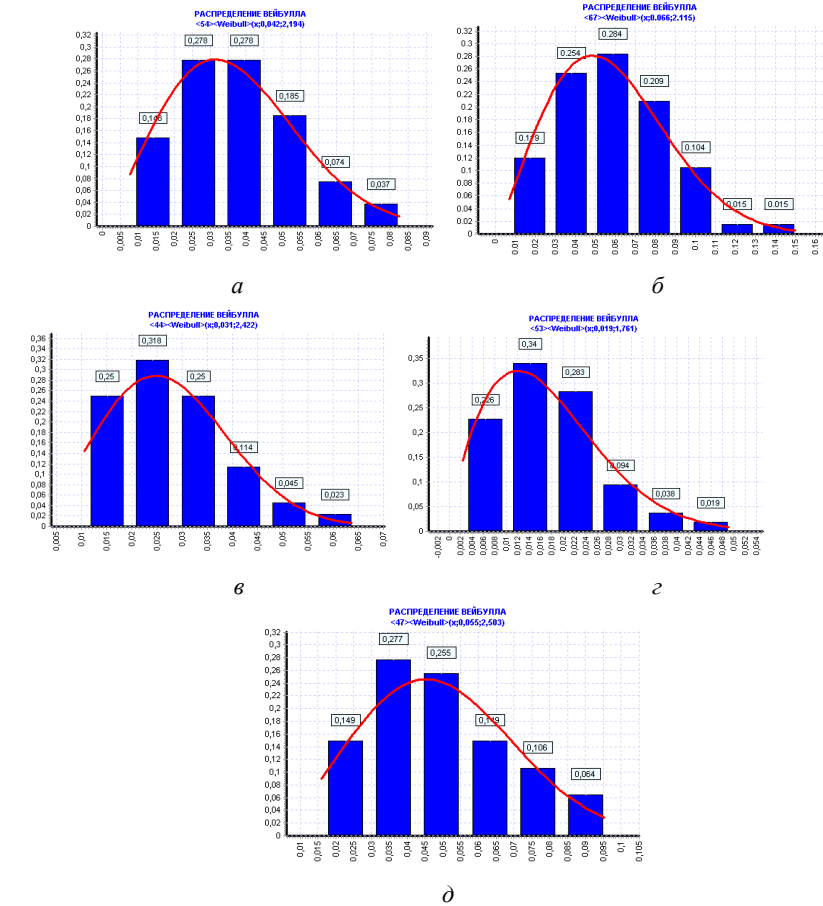


Рис. 6 – Гістограма емпіричного розподілу й функція щільності розподілу закону Вейбулла для газів, розчинених у маслі дефектних трансформаторів: а – зміст метану; б – зміст етилену; в – зміст етану; г – зміст ацетилену; д – зміст водню.

**Аналіз отриманих результатів.** Взаємне розташування теоретичних щільності розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі бездефектних і дефектних трансформаторів, наведено на рисунку 7. Там же наведені граничні значення рівнів 2 і 3, які рекомендовані в СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006.

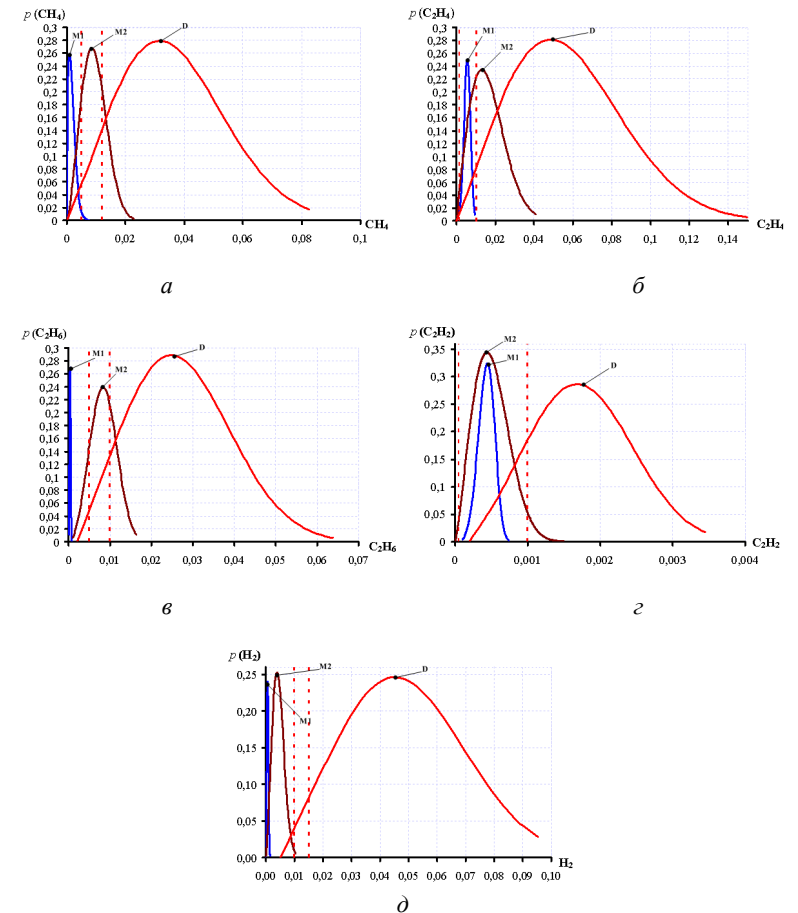


Рис. 7 – Щільності теоретичних розподілів газів для бездефектного (M1 і M2) і дефектного станів (D) і граничні значення концентрацій газів для рівнів 2 і 3, які рекомендовані в СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: а – зміст метану; б – зміст етилену; в – зміст етану; г – зміст ацетилену; д – зміст водню.



З рисунку 7 видно, що щільності розподілу для дефектних і бездефектних станів перетинаються, а це значить що принципово не можливо вибрати граничні значення показників, які б не давали помилкових рішень. У зв'язку із ці граничні значення концентрацій газів слід вибирати з використанням статистичних методів розпізнавання, наприклад методу мінімального числа помилкових рішень, метод мінімакса, метод мінімального ризику і т. д.

Оскільки для бездефектного стану наведені розподіли відповідні тільки мінімальним і максимальним концентраціям, а всі інші розподіли розташовані між ними, то можна зробити висновок, про те, що граничні значення для одного й того ж газу можуть різнитися, в залежності від умов експлуатації, конструктивних особливостей трансформаторів, типу масла та інших чинників.

Крім того з рисунку 7 видно, що площі областей перетинання дефектного й бездефектного стану, а саме вони визначають імовірність прийняття помилкових рішень, для різних газів відрізняються. Максимальна площа перетинання щільності розподілу, для бездефектного й дефектних станів, спостерігається в етилені. Для даного газу, навіть бездефектний розподіл з мінімальними значеннями концентрацій перетинається з розподілом для дефектного стану. Отримані результат дуже добре корелюється з даними наведеними в [10], у яких відзначається, що для негерметичного устаткування спостерігаються аномально високі концентрації етилену.

Мінімальна площа перетинань спостерігається у водню. Якщо врахувати, що в негерметичному устаткуванні поряд із процесом газоутворення має місце процес дифузії газів в атмосферу. А також досить низьке значення коефіцієнта розчинності водню в маслі, то стає очевидним і отримані закони розподілу й той факт, що в негерметичному устаткуванні значимі концентрації водню зустрічаються досить рідко.

Для інших газів площі перетинань мають проміжні значення.

Аналізуючи розташування граничних значень концентрацій газів для рівнів 2 і 3, які рекомендовані в СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 і розподілу газів для різних станів, легко побачити, що концентрації газів у бездефектних трансформаторах можуть перевищувати як рівень 2, так і рівень 3, за винятком водню. Концентрації газів у дефектних трансформаторах перебувають або між рівнями 2 і 3 або трохи вище рівня 3 (водень і етан).

#### **Висновки.**

1. Запропонований алгоритм статистичної обробки результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів, для формування

масивів з однорідними концентраціями в умовах апіорної невизначеності вхідної, вимірювальної інформації;

2. Виконаний аналіз, законів розподілу для дев'яти газів розчинених у маслі трансформаторів, що не мають дефекти. Встановлено, що всі дев'ять досліджуваних газів, підкоряються закону розподілу Вейбулла;

3. Виконаний аналіз, законів розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі дефектних трансформаторів. Встановлено, що всі газу вуглеводневого ряду й водень, також підкоряються закону розподілу Вейбулла;

4. Щільності розподілів для дефектних і бездефектних станів перетинаються, а це значить що принципово не можливо вибрати граничні значення показників, які б не давали помилкових рішень;

5. Площі областей перетинання дефектного й бездефектного стану, які визначають імовірність прийняття помилкових рішень, для різних газів відрізняються, при цьому мінімальний розмір площі перетинання має водень, максимальний – етилен;

6. Концентрації газів у бездефектних трансформаторах можуть перевищувати 2 і 3 рівні концентрацій які рекомендованих у СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Концентрації газів у дефектних трансформаторах перебувають або між рівнями 2 і 3 або трохи вище рівня 3 (водень і етан).

**Список літератури:** 1. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – Київ. – 2007. – 92 с; 2. Боярчуков Г. М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле / Г. М. Боярчуков // Новини енергетики. – 2010. – №7. – С. 23–33; 3. Биргер И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с; 4. Давиденко И.В. Исследование показателей, описывающих рабочее состояние маслonaполненных вводов, методами математической статистики // Журнал Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион: Технические науки. – 2006. – N 15 – С. 31-33 (ISSN 0321-2653); 5. Давиденко И.В. Определение допустимых значений контролируемых параметров маслonaполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных // Электричество. – 2009. – № 6 – С. 81 – 82; 6. Чулак Т. М., Южанников А.Ю. Оценка состояния трансформатора на основе золотого сечения // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 9 – С. 10 – 21; 7. Захаров А.В. Обнаружение дефектов силовых маслonaполненных трансформаторов как процедура проверки статистических гипотез / А.В. Захаров // Новое в российской энергетике. – 2001. – N 2 – С. 19 – 28; 8. Шутенко О.В. Особенности статистической обработки результатов эксплуатационных испытаний при исследовании законов распределения результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов / Шутенко О.В., Баклай Д.Н. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №60(1033). – С. 136–150; 9. 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 – Харьков.: НТУ «ХПІ», 2013. – 268 с.; 10. Абрамов В.Б. Особенности контроля маслonaполненного электрооборудования по результатам хроматографического анализа

растворенных в масле газов / В.Б. Абрамов // Электрические сети и системы. – 2012. – №4. – С. 77–79;

**Bibliography (transliterated):** 1. Diagnostika maslonapovnennogo transformatornogo obladnannja za rezul'tatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih u izoljacionomu masli SOU-N EE 46.501:2006. – Kiiv. – 2007. – 92 s; 2. Bojarchukov G. M. Prakticheskie problemy ocenki sostojanija vysokovol'tnogo oborudovanija po sodержaniju gazov v transformatornom masle. *Novini energetiki*. 2010. No 7. 23–33. Print. 3. Birger I.A. *Tehnicheskaja diagnostika* Moscow: Mashinostroenie. 1978. 4. Davidenko I.V. Issledovanie pokazatelej, opisuvajushhih rabochee sostojanie maslonapolnennyh vvodov, metodami matematicheskoj statistiki // *Zhurnal Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region: Tehnicheskie nauki*. 2006. No 15 31-33. Print. 5. Davidenko I.V. Opredelenie dopustimyh znachenij kontroliruemyh parametrov maslonapolnennogo oborudovanija na osnove massiva nabljudаемых данных. *Elektrichestvo*. 2009. No 6. 81 – 82. Print 6. Chupak T. M., Juzhannikov A.Ju. Ocenka sostojanija transformatora na osnove zolotogo sechenija. *Fundamental'nye issledovanija*. 2006. No 9. 10 – 21. Print. 7. Zaharov A.V. Obnaruzhenie defektov silovyh maslonapolnennyh transformatorov kak procedura proverki statisticheskikh gipotez. *Novoe v rossijskoj jenergetike*. 2001. No 2. 19 – 28 Print. 8. Shutenko O.V., Baklaj D.N. Osobennosti statisticheskoj obrabotki rezul'tatov ekspluatacionnyh ispytanij pri issledovanii zakonov raspredelenija rezul'tatov hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov. *Visnik NTU «HPI»*. 2013. No 60 (1033). 136–150. Print 9. Shutenko O.V., Baklaj D.N. *Planirovanie jeksperimental'nyh issledovanij v jelektrojenergetike. Metody obrabotki jeksperimental'nyh dannyh*. Har'kov: NTU «HPI». 2013. 10. Abramov V.B. Osobennosti kontrolja maslonapolnennogo jelektrooborudovanija po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov. *Jelektricheskie seti i sistemy*. 2012. No 4. 77–79. Print.

*Надійшла (received) 24.03.2014*

УДК 621.315.2

**Л.А. ЩЕБЕНЮК**, канд.техн.наук.,проф., НТУ «ХПИ»

**О.И. ПЕТРЕНКО**, студ., НТУ «ХПИ»

**И.И. УДОВЕНКО**, студ., НТУ «ХПИ»

## **КРИТЕРИЙ ВЫБОРА КОЭФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ ОБОЛОЧЕК ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**

Выполнен анализ результатов сравнения свойств кабельных полимеров для применения в оптических кабелях. Различные фирмы производители оптического волокна предлагают использование оптического волокна с различными коэффициентом преломления  $n_1$ . При этом возникает вопрос о соответствующем выборе коэффициента преломления  $n_2$  для полимерной оболочки, поскольку разность  $n_1 - n_2$  определяет большинство эксплуатационных характеристик оптического кабеля.

**Ключевые слова:** кабельные полимеры, коэффициент преломления, параметры оптического волокна

**Постановка проблемы.** При разработке конструкций и выборе параметров кабельных полимерных материалов, при выборе оптимального материала для конкретного променения всегда возникает проблема ограничения спектра параметров материала, которые являются определяющими.

Для обеспечения соответствия эксплуатационным требованиям к кабельным полимерам используют огромное количество различных параметров: механическая и электрическая прочность, электрофизические и оптические параметры, параметры пожарной безопасности и многие, многие другие.

**Анализ литературы.** Различные фирмы производители оптического волокна предлагают использование оптического волокна с различными коэффициентом преломления  $n_1$  (см. табл.1). При этом возникает вопрос о соответствующем выборе коэффициента преломления  $n_2$  для полимерной оболочки, поскольку разность  $n_1 - n_2$  определяет большинство эксплуатационных характеристик оптического кабеля.

Так модовая дисперсия как результат фазового запаздывания передаваемых волн является одной из причин распывания импульса при его передаче по оптическому волокну (ОВ) [1].

**Цель работы.** Выбор оптимального критерия для

© Л. А. Щебенюк, О. И. Петренко, И. И. Удовенко, 2014

определения разность  $n_1 - n_2$ , которая определяет большинство эксплуатационных характеристик оптического кабеля.

**Основные результаты.** На рис. 1 приведены зависимости дисперсии, которая является важнейшим параметром оптического волокна и определяет его пропускную способность для передачи информации, от коэффициента преломления  $n_2$  для полимерной оболочки.

Дисперсия  $\tau$  – рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала, при увеличении которого увеличивается длительность импульса оптического излучения при распространении его по ОВ:

$$\tau = (n_1 - n_2) \cdot K_y \cdot 10^9 \cdot l_s / c_0, \quad (1)$$

где  $K_y$  – коэффициент укрутки;

$l_s$  – средняя длина участка (показатель разветвленности цепи);

$c_0$  – скорость света.

Таблица – Коэффициенты преломления света оптоволокна, используемого различными производителями

Производитель	Значение показателя преломления для длины волны 1550 нм	Поправочный коэффициент пересчета
Fujikura	1,4673	0,9995
Lucent	1,4670	0,9993
Alcatel	1,4700	1,0013
Samsung	1,4695	1,0010
Pirelli	1,4681	1,0000

Там же нанесена зависимость коэффициента широкополосности  $k_p$  от коэффициента преломления  $n_2$  для полимерной оболочки:

$$k_p = 1 / (n_1 - n_2) \cdot K_y / c_0, \quad \text{где } n_1 = 1,46. \quad (3)$$

Из рис. 1 видно, что дисперсия уменьшается при увеличении коэффициента преломления  $n_2$  для полимерной оболочки, но

производная этой зависимости по абсолютной величине тем меньше, чем меньше  $l_s$  – средняя длина участка (показатель разветвленности цепи).

Следовательно применение больших значений коэффициента преломления  $n_2$  для полимерной оболочки позволяет достаточно эффективно уменьшить дисперсию для менее разветвленных цепей (магистральные оптические кабели). Но этот же прием практически неэффективен в сильно разветвленных цепях.

Коэффициент широкополосности  $k_p$  нелинейно увеличивается при увеличении коэффициента преломления  $n_2$  для полимерной оболочки. На рис. 1 нанесены горизонтальные прямые, которые ограничивают дисперсию ОВ:  $\tau = 3$  нс, с одной стороны, и коэффициент широкополосности  $k_p \leq 5 \cdot 10^5$  МГц, с другой.

Волноводная среда, образованная для ОВ двумя середями, – сердцевинной и оболочкой, обуславливает волноводную дисперсию, которая обусловлена эффективным показателем преломления моды.

У одномодовых ОВ волноводная дисперсия практически отсутствует, потому одномодовые ОВ имеют сравнительно меньшее затухание и соответственно большее расстояние между усилителями.

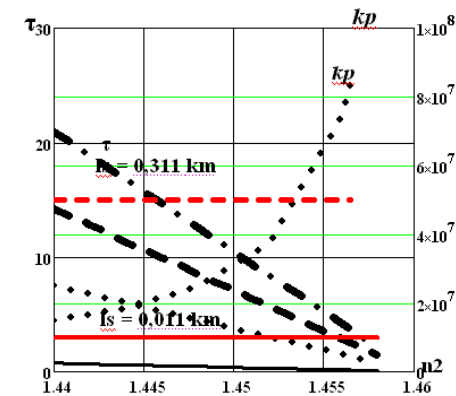


Рис. 1 – Зависимости дисперсии  $\tau$  оптического волокна (ОВ) от коэффициента преломления  $n_2$  для полимерной оболочки при различной средней длине  $l_s$  участка ОВ (показатель разветвленности цепи) и зависимость коэффициента широкополосности  $k_p$  от коэффициента преломления  $n_2$  для полимерной оболочки при одинаковых значениях коэффициента преломления ОВ, который равен 1,46

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для разветвленных цепей оптической сети при заданном значении показателя преломления ОВ допустимый диапазон значений коэффициента преломления n2 для полимерной оболочки быстро сужается по мере увеличения разветвленности. В таких случаях оптимальным является выбор больших значений показателя преломления ОВ.

На рис.1 видно, что дисперсия ОВ  $\tau$  снижается по мере увеличения коэффициента преломления n2 для полимерной оболочки, причем, тем быстрее, чем менее разветвленная сеть оптической связи. С другой стороны, сами значения дисперсия ОВ  $\tau$  меньше для более разветвленной сети.

Коэффициент широкополосности  $kp$  напротив, – ускоренно растет по мере увеличения коэффициента преломления n2 для полимерной оболочки.

Given

$$\text{Zatr} = \text{Cik} \cdot L \cdot Kk + L \cdot 2 \cdot kz \cdot \frac{\text{Cik}}{ls} \quad \tau = (n1 - n2) \cdot \frac{Ky \cdot 10^9 \cdot ls}{C0}$$

$$A_0 = 4.34 \cdot \frac{8 \cdot \pi^3 \cdot (n1^2 - 1)}{3 \cdot \lambda^4} \cdot k \cdot \beta \cdot T \cdot (1 + Kn) \cdot 10^3 \quad kp = \left( \frac{\tau}{ls} \cdot 10^{-9} \right)^{-1}$$

$$N = \frac{\left[ 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{(n1^2 - n2^2)^{0.5}}{\lambda} \right]^2}{2} \quad \text{Find}(\text{Zatr}, \tau, kp, N, A_0) = \begin{pmatrix} 1.05 \times 10^5 \\ 12.12 \\ 2.475 \times 10^7 \\ 191.339 \\ 0.148 \end{pmatrix}$$

Рис.2 – Система уравнений, решаемых совместно для анализа влияния разветвленности оптической сети при заданных значениях показателей преломления ОВ и оболочки: Zatr – затраты на кабели и кабельный гарнитур;  $\tau$  – дисперсия;  $A_0$  – апертура;  $kp$  – коэффициент широкополосности

**Выводы.** 1) Дисперсия ОВ  $\tau$  снижается по мере увеличения коэффициента преломления n2 для полимерной оболочки, причем, тем быстрее, чем менее разветвленная сеть оптической связи. С другой стороны, сами значения дисперсия ОВ  $\tau$  меньше для более

разветвленной сети. Значение коэффициента преломления ОВ одинаково ( $n1 = 1,46$ ).

2) Коэффициент широкополосности  $kp$  ускоренно растет по мере увеличения коэффициента преломления n2 для полимерной оболочки.

3) Для разветвленных цепей оптической сети при заданном значении показателя преломления ОВ допустимый диапазон значений коэффициента преломления n2 для полимерной оболочки быстро сужается по мере увеличения разветвленности. В таких случаях оптимальным является выбор больших значений показателя преломления ОВ.

**Список литературы:** 1. И.Б. Пешков. Материалы кабельного производства. – М.: Машиностроение. 20013.- 455 с 2. М.А. Колтунов, В.П. Майборода, В.Г. Зубчанинов. Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов – М.: Машиностроение. 1983.- 239 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. I.B. Peshkov. *Materialy kabel'nogo proizvodstva*. Moscow: Mashinostroenie. 2013. DSTU IEC 811-1-1:2003 Materiali izoljacii ta obolonok elektrichnih ta optichnih kabeliv. Zagal'ni metodi viprobuvan' Chastina 1-1. 2. M.A. Koltunov, V.P. Majboroda, V.G. Zubchaninov. *Prochnostnye raschety izdelij iz polimernyh materialov* – Moscow: Mashinostroenie. 1983.

Надійшла (received) 24.11.2013

**Л.А. ЩЕБЕНЮК**, канд. техн. наук., проф., НТУ «ХПИ»

**С.А. РЯБИНИН**, студ., НТУ «ХПИ»

**А.И. СТУРЧЕНКО**, студ., НТУ «ХПИ»

## К АНАЛИЗУ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ АНТИПИРЕНАМИ ПВХ-ПЛАСТИКАТОВ

Выполнен анализ результатов сравнения механических свойств наполненного ПВХ-пластиката, для которых обеспечение требований пожарной безопасности диктует рецептуры ПВХ-пластикатов, предназначенных для изоляции, оболочек и внутреннего заполнения кабелей. В частности, высокое значение кислородного индекса, низкое значение параметра дымообразования и выделения хлористого водорода.

**Ключевые слова:** ПВХ-пластикат, антипирен, механическая прочность, время

**Постановка проблемы.** Для обеспечения требований пожарной безопасности электрических кабелей (см. табл.) разрабатываются рецептуры ПВХ-пластикатов, предназначенных для изоляции, оболочек и внутреннего заполнения кабелей. У разработанных пластикатов более высокое значение кислородного индекса, низкое значение параметра дымообразования и выделения хлористого водорода, а также пониженная токсичность продуктов горения.

Таблица. Основные показатели пожарной опасности электрических кабелей

Наименование показателя	Обозначение в марках кабелей	Нормативный документ для оценки показателя
Нераспространение горения	Индекс «нг» (нераспространение горения)	МЭК 60332 часть 3
Дымо-, газовыделение при горении и тлении	Индекс «LS» (Low smoke)	МЭК 61034 часть 1 и 2
Коррозионная активность продуктов горения	Индекс «HF» (Halogen free)	МЭК 60754 часть 2
Огнестойкость	Индекс «FR» (Fire resistance)	МЭК 60331-11 МЭК 60331-21

© Л. А. Щебенюк, С. Я. Рябинин, А. И. Стурченко, 2014

Однако использование антипиренов достаточно сильно изменяет технологические свойства пластиката. Особенно актуальна эта проблема для высоконаполненных композиций. Для выбора технологических параметров переработки ПВХ-пластикатов, наполненных антипиренами, и поиска оптимальных составов многокомпонентных структур в кабельном производстве необходим контроль механических характеристик образцов соответствующих композиционных материалов.

**Анализ литературы.** При определении механических характеристик кабельных пластмасс в условиях производства предусмотрен [1] контроль на стандартных образцах следующих характеристик:

- максимального усилия  $P_m$  (maximum tensile force), напряжения  $\sigma = P/F$  (tensile stress), максимального напряжения  $\sigma_m = P_m / F$  (tensile strength) при одноосном растягивании,

- относительного удлинения при разрыве  $\delta = (l - l_0) \cdot 100/l_0$ , % (elongation at break), где  $F$  - площадь поперечного сечения образца,  $l_0$  - длина его до разрыва и  $l$  - длина после разрыва.

При этом не учитывается динамика изменения механических характеристик во времени, которая является важным фактором, определяющим изменение прочности пластмассы в течение эксплуатации [2].

Известно, что кабельные пластмассы, как и все полимерные материалы и их композиции, являются материалами, для которых зависимость между напряжением и деформацией зависит от времени. Такие материалы называют вязкоупругими. Процессы деформирования вязкоупругих материалов описывает теория наследственной вязкоупругости, основанная на двух фундаментальных положениях:

1) Силы упругости зависят не только от мгновенных смещений, но и от предыдущих деформаций, которые тем меньше влияют на эти силы, чем больше время прошло с момента появления этих деформаций.

То есть, деформация  $\varepsilon(t)$  вязкоупругого тела в момент времени  $t$  определяется напряжением  $\sigma(t)$  в данный момент плюс деформация  $\Delta\varepsilon$ , которая возникла в предыдущий малый период времени:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \Delta\varepsilon, \quad (1)$$

где  $E$  - модуль упругости.

2) Влияния деформаций, которые возникли в различные периоды времени складываются:

$$\Delta \varepsilon = \sum \frac{\sigma(s)}{E} \cdot \Delta s \cdot K(t-s), \quad (2)$$

где  $K(t-s)$ - функция влияния напряжения  $\sigma(s)$  в момент времени  $s$  на деформацию в момент времени  $t$ , которая уменьшается по мере увеличения  $t-s$ . Для  $\Delta s \rightarrow 0$  связь деформации, напряжения и времени для вязкоупругого тела:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t K(t-s) \cdot \sigma(s) ds. \quad (3)$$

Для практических применений в кабельной технике важным является тот случай, когда механическое напряжение – постоянная величина, поскольку известно, что после изготовления изоляции или оболочки из пластмассы в них всегда есть внутренние механические напряжения. Если  $\sigma(t) = \sigma(s) = \sigma$ , то дифференцирование (3) дает возможность определить функцию влияния  $K(t)$ :

$$K(t) = \frac{E}{\sigma} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (4)$$

То есть функция влияния пропорциональна скорости деформирования при действии постоянного механического напряжения. Соответствующие зависимости определяют экспериментально.

**Цель работы.** Экспериментальное определение характерных зависимостей механического напряжения от времени одноосного растяжения для образцов стандартных и высоконаполненных антипиренами ПВХ-пластиков. Сравнение и анализ различия этих характеристик.

**Основные результаты.** На рис. 1 представлены характерные зависимости механического напряжения от времени при одноосном растяжении для образцов стандартного ПВХ-пластика и образцов, высоконаполненных антипиренами (мегалон).

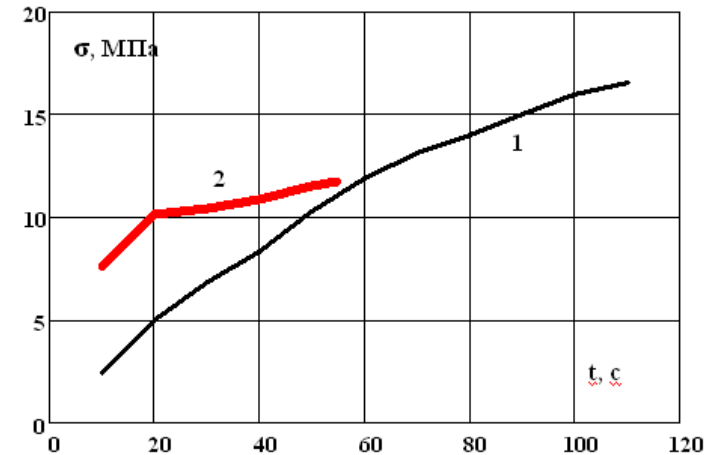


Рис.1 – Характерные зависимости механического напряжения от времени при одноосном растяжении для образцов стандартного ПВХ-пластика (кривая 1) и образцов, высоконаполненных антипиренами (мегалон, – кривая 2)

Данные рис.1 свидетельствуют о том, что для образцов высоконаполненных антипиренами (мегалон, – кривая 2) наблюдается явление, которое можно условно назвать «текучесть». При этом деформация образца линейно растет (пропорционально времени), а сопротивление деформации меняется незначительно. На участке от 10 с до 20 с 2,5 МПа/с, а на участке от 20 с до 40 с 0,005 МПа/с. Различие столь значительно, что пренебречь им нельзя. Эти наблюдения свидетельствуют, что, во-первых, для образцов высоконаполненных антипиренами ПВХ-пластиков явление, которое можно условно назвать «текучесть», является воспроизводимым и потому должно быть количественно описано. Во-вторых, результаты такого количественного описания должны сопоставлены с результатами нормативных испытаний образцов при одноосном растяжении.

Модель, использованная для количественного описания участка «текучести», представлена на рис.2, где АВ – участок «текучести» длительностью, равной расстоянию между точками А и В в данной системе координат и обозначенной  $\Delta t$  тек, и с напряжением  $\sigma$  тек =  $P$  тек/ $F$ .

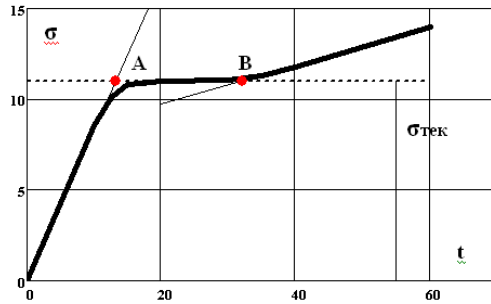


Рис.2 – Схема, использованная для количественного описания участка «текучести», наблюдаемого у образцов высоконаполненных антипиренами ПВХ-пластиков

Если в качестве оценки участка «текучести» принять определенный интеграл функции  $\sigma = f(t)$  на этом участке, то оценка представляет собой по размерности величину, входящую в целый ряд законов гидродинамики вязких сред, и называемую коэффициентом внутреннего трения  $\eta$ :

$$\eta = \int_{t_A}^{t_B} \sigma(t) dt \approx (t_B - t_A) \cdot \sigma_{\text{тек}}. \quad (5)$$

Коэффициент внутреннего трения  $\eta$  в СИ измеряют в паскалях, умноженных на секунды, и для мегалона составляет (140 – 160) Па·с. Для образцов высоконаполненного антипиренами ПВХ-пластика ПО – 100 составляет (160 – 200) Па·с. Для образцов стандартного ПВХ-пластика (кривая 1 на рис.1) участок «текучести» не определяется. Минимальное значение коэффициента внутреннего трения  $\eta$ , определенного по участку «текучести», отражает степень наполненности пластика, а диапазон значений – степень однородности распределения частиц твердого наполнителя в композиции.

Выводы. 1. Для образцов высоконаполненных антипиренами ПВХ-пластиков явление, которое можно условно назвать «текучесть», является воспроизводимым и потому должно быть количественно описано. Предложено принять определенный интеграл функции  $\sigma = f(t)$  в качестве такой оценки, которая представляет собой величину, входящую в целый ряд законов гидродинамики вязких сред, и называемая коэффициентом внутреннего трения  $\eta$ .

2. Экспериментальная оценка коэффициента внутреннего трения  $\eta$  по участку «текучести» зависимости механического напряжения от времени при одноосном растяжении для образцов наполненных

антипиренами ПВХ-пластиков дает дополнительную информацию о процессах деформирования и разрушения высоконаполненного пластика при одноосном растяжении.

**Список литературы:** 1. ДСТУ ІЕС 811-1-1:2003 Матеріали ізоляції та оболонки електричних та оптичних кабелів. Загальні методи випробувань Частина 1-1. 2. М.А. Колтунов, В.П. Майборода, В.Г. Зубчанинов. Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов – М.: Машиностроение. 1983.- 239 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. DSTU IEC 811-1-1:2003 Materiali izoljacji ta obolonok elektrichnih ta optichnih kabeliv. Zagal'ni metodi viprobuvan' Chastina 1-1. 2. M.A. Koltunov, V.P. Majboroda, V.G. Zubchaninov. Prochnostnye raschety izdelij iz polimernih materialov – Moscow: Mashinostroenie. 1983.

Надійшла (received) 25.11.2013



## РЕФЕРАТИ

УДК 621.315.2

**К расчету электрического поля в изоляции эмальпровода с изоляцией на основе полиимидных сополимеров** / С.Ю. Антонец, Л.А. Щепенюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 3–10. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349

Виконано моделювання електричного поля в емаль ізоляції, оцінений розмір ділянки концентрації напруженості біля дефекту поверхні провідника. Нові для вітчизняної промисловості емальдроти із ізоляцією із поліімідних сополімерів мають дуже високі електрофізичні властивості, в тому числі високий рівень пробивних напруг. Оцінений вплив неоднорідностей на розподіл напруженості електричного поля в ізоляції.

**Ключові слова:** емальдріт, дефект мідного дроту, напруженість електричного поля.

УДК 658.562

**Оценка параметров случайных процессов загрязнения окружающей среды энергетическими предприятиями** / С. Ф. Артюх, Н. А. Любимова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 11–16. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349

У статті виконана оцінка параметрів випадкових процесів забруднення навколишнього середовища енергетичними підприємствами, проведений аналіз реалізацій процесів забруднення, а також аналіз гістограм, розподіли значень процесів забруднення. Аналіз реалізацій процесів забруднення показує що в них поряд із одиничними екстремальними викидами присутні низькочастотні складові. Такі складові можуть вважатись періодичними трендами із випадковими амплітудами та фазами.

**Ключові слова:** забруднення атмосфери, закон розподілу, обробка, компонент атмосферного забруднення.

УДК 621.311

**Реальные возможности ветроэнергетики Украины/ Ю. В. Владимиров, Е. Э. Пилипенко** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2014. – № 24 (1067). – с. 17 – 21. Бібліогр: 6 назв. Іл.:1. – ISSN 2224-0349.

В роботі наведені дослідження та дана реальна оцінка можливостям вітроенергетики України. Впровадження поняття теоретичного та реального технічного потенціалу вітроенергетики, а також коефіцієнта економічних можливостей. Наведена карта середньозважені швидкості вітру по регіонам України. Вказані фактичні середньорічні коефіцієнти використання встановленої потужності вітроелектростанцій різних регіонів України. Розраховано можливе сумарне виробництво електроенергії ВЕС України з урахуванням реального технічного потенціала та коефіцієнту економічних можливостей.

**Ключові слова:** вітроенергетика, вітроустановка, потенціал, виробка електроенергії.

УДК 629.764.064.5

**Анализ и выбор электрохимических аккумуляторов для энергоустановок долго живущих космических аппаратов** / В. В. Гасанова, Ю. Г. Каторгина, Я. А. Столяров, Е. Г. Чечина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та

енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 22 – 32. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2224-0349

Проведено аналіз типів акумуляторів, які використовуються в енергоустановках космічних апаратів. Сформульовано рекомендації відносно вибору електрохімічної системи для космічних апаратів строком експлуатації більш ніж 10 років. Проведено розрахунки вартості системи енергопостачання з використанням різноманітних типів акумуляторів. Показано, що найбільш оптимальним, с точки зору вартості запуску, типом акумуляторів є електрохімічні системи на базі літію.

**Ключові слова:** система енергопостачання, акумулятор, акумуляторна батарея, космічний апарат, орбіта

УДК 621.315

**Разрушение увлажненного поверхностного слоя полимерной изоляции при грозовых перенапряжениях** / А. Г. Гурич, Ю. Г. Гончарь // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 33-39. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2224-0349

Наведено результати експериментальних досліджень процесу розвитку поверхневого розряду по сухій та зволоженої поверхні полімерної ізоляції для системи електродів «голка-площина» при впливі імпульсів перенапруги позитивної полярності. Показано вплив зволоження поверхні ізоляції на зону руйнування поверхні, загострення фронту імпульсів напруги в шарі зволоження, створення умов для зростання водних дендритів в місцях формування поверхневого розряду.

**Ключові слова:** поверхневий розряд, зволожена поверхня, високовольтні імпульси перенапруг.

УДК 551.594.221

**Імітаційне моделювання влучення розряду довгої іскри в точки площини в неоднорідному полі** / А. О. Куксов, О. О. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 40-49. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349

У статті запропонована двокрокова імітаційна модель влучення розряду довгої іскри в площину. Підтверджено адекватність розробленої моделі. Розроблена комп'ютерна програма для чисельного імітаційного моделювання. Наведено результати чисельного імітаційного моделювання імовірнісного процесу влучення довгої іскри в площину. Здійснено порівняння результатів моделювання щільності розподілу точок ураження з даними експерименту.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, електричний розряд, щільність розподілу.

УДК 621.311

**Щодо визначення вартості електричної енергії для побутових споживачів / О.П. Лазуренко, Г.І. Черкашина // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 24 (1067). – С. 50–55. Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2224-0349**

У роботі розглянутий механізм формування тарифу на електричну енергію для побутових споживачів, виявлені фактори, які безпосередньо впливають на розмір тарифу, наведені дані по споживанню електричної енергії мешканцями 9-типоверхового житлового будинку, визначено тариф на електричну енергію для споживачів 9-ти поверхового житлового будинку та обсяг дотацій. Показано, що диференціювати тариф на електричну енергію необхідно не за об'ємом її споживання, а за режимами споживання електричної енергії кінцевим споживачем.

**Ключові слова:** побутовий споживач електричної енергії, роздрібний тариф на електричну енергію, нормативні технологічні втрати, змінні розрахункові втрати, умовно постійні втрати.

УДК 621.625.032

**Способы построения энергосберегающих электромеханических стендов для испытания двигателей внутреннего сгорания / Г. И. Мельников А. О. Коротков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 24 (1067). – С. 56–62. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349**

У даній роботі детально розглянута проблема підвищення енергоефективності робота енергозберігаючих електромеханічних стендів для випробувань двигунів внутрішнього згорання. Розглядаються методи підвищення енергоефективності робота випробувальних стендів. Описано метод модернізації випробувальних стендів. Розглянуто принципи схеми цих модифікованих випробувальних стендів. Детально описано принцип роботи модифікованих випробувальних стендів. Наведено позитивні і негативні сторони модифікацій випробувальних стендів. Обґрунтовано завдання створення математичних моделей випробувальних стендів для подальшого дослідження.

**Ключові слова:** двигуни внутрішнього згорання, випробувальні стенди, частотний перетворювач, генератор з постійними магнітами, асинхронний генератор, машина постійного струму, асинхронізований синхронний генератор.

УДК 621.315:621.3.048

**Влияние гидрофобизации изоляторов на распределение напряжения по их поверхности / П. Е. Пономарев, А. П. Пономарева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 24 (1067). – С. 63-68. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349**

Гідрофобні покриття як один із засобів захисту зовнішньої ізоляції від перекриттів при забрудненнях стали застосовувати ще в довоєнний час, однак всебічне дослідження їх властивостей і широке впровадження в практику почато тільки в шістдесяті роки. Найбільшого поширення ці покриття знаходять на підстанціях, що забруднюються, значно рідше вони застосовуються на ділянках ПЛ, хоча і тут намічається тенденція до розширення їх використання.

**Ключові слова:** гідрофобізація поверхні, фарфорові ізолятори, гірлянда ізоляторів, розподіл напруги.

УДК 621.314

**Исследование распространения высших гармоник вдоль линии электропередач / Н.В. Рудевич // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та**

**енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – . - № 24 (1067). – С. 69–74 Бібліогр.4 назв. – ISSN 2224-0349**

В статті пропонуються результати дослідження розповсюдження вищих гармонік уздовж лінії електропередач, здобутих у результаті комп'ютерної реалізації математичної моделі лінії електропередач у фазних координатах. Порівняно форму кривих струму та напруги на початку та в кінці лінії. Зроблено висновки щодо впливу довжини лінії, наявності грозозахисного тросу на розповсюдження вищих гармонік.

**Ключові слова:** вищі гармоніки, математична модель, лінія електропередач, фазні координати, комп'ютерне моделювання.

УДК 621.315

**Анализ существующих методов выравнивания напряженности и потенциала вдоль стержня турбогенератора на выходе его из паза статора / С. А. Сокол // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 24 (1067). – С. 75-81. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349**

Приведені існуючі методи вирівнювання електричного поля в зонах підвищеної напруженості та на виході стержня із пазу, наведені програмні розрахунки і побудована картина розподілу напруженості електричного поля без використання та з використанням напівпровідної стрічки. Розглянуті можливості градування ізоляції та показано можливість виникнення поверхневих та часткових розрядів в зоні нерівномірної напруженості електричного поля.

**Ключові слова:** частковий розряд, коронування, напруженість електричного поля, напівпровідне покриття

УДК 678

**Исследование электрофизических свойств композиций на основе поливинилхлорида для изоляции силовых кабелей низкого напряжения / В. Л. Чулеев, В. М. Золотарев, Е. В. Чулеева, С. Ю. Антонен // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 24 (1067). – С. 82-89. – Бібліогр.: 9 назв.**

Представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень електрофізичних властивостей полімерних композицій на основі полівинілхлориду (ПВХ). Вивчений вплив інгредієнтів на технологічні властивості ПВХ композицій. Визначені основні відмінності електрофізичних властивостей матеріалів ізоляції в залежності від водопоглинання. Розроблені композиції на основі ПВХ для ізоляції силових кабелів низької напруги мають високі технологічні, фізико-механічні, а також електрофізичні характеристики.

**Ключові слова:** полівинілхлорид (ПВХ), питомий об'ємний електричний опір, діелектрична проникність, тангенс кута діелектричних втрат, час витримки у воді, водопоглинання, ізоляція, полімерна композиція.

УДК 621.315

**Проблемные вопросы выбора и применения полимерной изоляции для воздушных линий электропередачи / Ю. Н. Шумилов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 24 (1067). – С.90–101. Бібліогр.5 назв. – ISSN 2224-0349.**

У статті показана необхідність коректування діючої в Україні нормативної документації (НД), що стосується вибору і експлуатації полімерної ізоляції, зокрема, з питання вибору довжини шляху витоку в забруднених районах і з оновлення вимог до випробувальних напруг грозозахисного і комутаційного імпульсу. Рекомендовані в даній статті

скоректовані імпульсні випробувальні напруги, а також ізоляційна довжина полімерних ізоляторів дозволять забезпечити їх надійнішу роботу в електричних мережах і підвищити конкурентоспроможність на зовнішньому і внутрішньому ринках.

**Ключові слова:** лінійні полімерні ізолятори, нормативна документація, коректування, ступінь забруднення атмосфери, довжина шляху витoku, випробувальні напруги, грозовий і комутаційний імпульси.

УДК 621.314

**Анализ законов распределения концентраций газов, растворенных в масле высоковольтных трансформаторов негерметического исполнения / Д. Н. Баклай, О. В. Шутенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 102–117. Бібліогр. 10 назв. – ISSN 2224-0349.**

Запропоновано алгоритм статистичної обробки результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів, для формування масивів з однорідними концентраціями в умовах апріорної невизначеності вхідної, вимірювальної інформації. Виконані дослідження законів розподілу газів розчинених у маслі бездефектних і дефектних трансформаторів. Установлено, що щільності розподілів для дефектних і бездефектних станів перетинаються, а це значить що принципово не можливо вибрати граничні значення показників, які б не давали помилкових рішень.

**Ключові слова:** хроматографічний аналіз, дефект що розвивається, статистична обробка, закони розподілу, критерій згоди.

УДК 621.315.2

**Критерий выбора коэффициента промещения света для полимерных оболочек оптического волокна / Л.А. Щепенюк, О.И. Петренко, И.И. Удовенко, // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 118-122. – Бібліогр.: 2 назви. – ISSN 2224-0349**

Виконаний аналіз результатів порівняння властивостей кабельних полімерів для використання в оптичних кабелях. Різні фірми виробники оптичного волокна пропонують використання оптичного волокна із різними коефіцієнтами заломлення  $n_1$ . При цьому виникає питання про відповідний вибір коефіцієнта заломлення  $n_2$  для полімерної оболонки, оскільки різниця  $n_1 - n_2$  визначає більшість експлуатаційних характеристик оптичного кабелю.

**Ключові слова:** кабельні полімери, коефіцієнт заломлення, оптичне волокно.

УДК 621.315.2

**К анализу зависимости механического напряжения от времени одноосного растяжения для образцов высоконаполненных антипиренами ПВХ-пластикатов / Л.А. Щепенюк, С. Я. Рябинин, А. И. Стурченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 123-128. – Бібліогр.: 2 назви. – ISSN 2224-0349**

Виконаний аналіз результатів порівняння механічних властивостей наповненого ПВХ-пластикату, для яких забезпечення вимог пожежної безпеки вимагає рецептури ПВХ-пластикатів, призначених для ізоляції, оболонки і внутрішнього заповнення кабелів. Це високе значення кисневого індексу та низьке значення параметру димовиділення.

**Ключові слова:** ПВХ-пластикат, антипирен, механічна міцність, час

## РЕФЕРАТЫ

УДК 621.315.2

**К расчету электрического поля в изоляции эмальпровода с изоляцией на основе полиимидных сополимеров / С.Ю. Антонец, Л.А. Щепенюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 3 – 10. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349**

Выполнено моделирование электрического поля в эмальизоляции, оценен размер области концентрации напряженности вокруг дефекта поверхности проводника. Выполнена оценка влияния размеров неоднородностей на напряженность электрического поля в эмальизоляции. Новые для отечественной промышленности эмальпровода с изоляцией из полиимидных сополимеров имеют очень высокие электрофизические характеристики, в том числе, высокий уровень пробивных напряжений.

**Ключевые слова:** эмальпровод, дефект медного провода, напряженность электрического поля.

УДК 658.562

**Оценка параметров случайных процессов загрязнения окружающей среды энергетическими предприятиями / С. Ф. Артюх, Н. А. Любимова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 11 – 16. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349**

В статье выполнена оценка параметров случайных процессов загрязнения окружающей среды энергетическими предприятиями, проведен анализ реализаций процессов загрязнения, а также анализ гистограмм, распределения значений процессов загрязнения. Анализ реализаций процессов загрязнения показывает, что в них, наряду с одиночными экстремальными выбросами, присутствуют низкочастотные псевдогармонические составляющие.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы, закон распределения, обработка, компонент атмосферного загрязнения.

УДК 621.311

**Реальные возможности ветроэнергетики Украины/ Ю. В. Владимиров, Е. Э. Пилипенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП». – 2014. – № 24 (1067) С.17-21. Бібліогр: 6 назв. Іл.:1. – ISSN 2224-0349.**

В статье приведены исследования и дана реальная оценка возможностям ветроэнергетики Украины. Введены понятия теоретического и реального технического потенциала ветроэнергетики, а также коэффициента экономических возможностей. Показана карта средневзвешенных скоростей ветра по регионам Украины. Указаны фактические среднегодовые коэффициенты использования установленной мощности ветроэлектростанций разных регионов Украины. Посчитано возможное суммарное производство электроэнергии ВЭС Украины с учетом реального технического потенциала и коэффициента экономических возможностей.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ветроустановка, потенциал, выработка электроэнергии.

УДК 629.764.064.5

**Анализ и выбор электрохимических аккумуляторов для энергоустановок долго живущих космических аппаратов / В. В. Гасанова, Ю. Г. Каторгина, Я. А. Столяров, Е. Г. Чечина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та**

энергоэффективность. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 22 – 32. Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2224-0349

Проведен анализ типов аккумуляторов, используемых в энергоустановках космических аппаратов. Сформулированы рекомендации касательно выбора электрохимической системы для космических аппаратов сроком службы более 10 лет. Проведен расчет стоимости системы энергоснабжения с использованием различных типов аккумуляторов. Показано, что наиболее оптимальным, с точки зрения стоимости запуска, типом аккумуляторов являются электрохимические системы на основе лития.

**Ключевые слова:** система энергоснабжения, аккумулятор, аккумуляторная батарея, космический аппарат, орбита.

УДК 621.315

**Разрушение увлажненного поверхностного слоя полимерной изоляции при грозовых перенапряжениях / А. Г. Гурии, Ю. Г. Гонтарь // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24(1067). – С. 33 -39. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2224-0349**

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса развития поверхностного разряда по сухой и увлажненной поверхности полимерной изоляции для системы электродов «игла-плоскость» при воздействии импульсов перенапряжения положительной полярности. Показано влияние увлажнения поверхности изоляции на зону разрушения поверхности, обострение фронта воздействующих импульсов напряжения в слое увлажнения, создание условий для роста водных дендритов в местах формирования поверхностного разряда.

**Ключевые слова:** поверхностный разряд, увлажненная поверхность, высоковольтные импульсы перенапряжений.

УДК 551.594.221

**Имитационное моделирование попадания разряда длиной искры в точки плоскости в неоднородном поле / А. О. Куков, О. О. Петков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – №24 (1067). – С. 40-49 – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349**

В статье предложена двухшаговая имитационная модель попадания разряда длиной искры в плоскость. Разработана программа для численного моделирования. Подтверждена адекватность разработанной модели. Приведены результаты численного имитационного моделирования вероятностного процесса попадания длиной искры в плоскость. Произведено сравнение результатов моделирования плотности распределения точек поражения с данными эксперимента.

**Ключевые слова:** численное моделирование, электрический разряд, плотность распределения.

УДК 621.311

**К определению стоимости электрической энергии для бытовых потребителей / А.П. Лазуренко, Г.И. Черкашина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 50-55. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2224-0349**

В работе рассмотрен механизм формирования тарифа на электрическую энергию для бытовых потребителей, выявлены факторы, которые непосредственно влияют на величину тарифа, приведены данные по потреблению электрической энергии жильцами 9-этажного жилого дома, определен тариф на электрическую энергию для потребителей 9-этажного жилого дома и объем дотаций. Показано, что

дифференцировать тариф на электрическую энергию необходимо не по объемам ее потребления, а по режимам потребления электрической энергии конечным потребителем.

**Ключевые слова:** бытовой потребитель электрической энергии, розничный тариф на электрическую энергию, нормативные технологические потери, переменные расчетные потери, условно постоянные потери.

УДК 621.625.032

**Способы построения энергосберегающих электромеханических стендов для испытания двигателей внутреннего сгорания / Г. И. Мельников А. О. Коротков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 56–62. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349**

В данной работе детально рассмотрена проблема повышения энергоэффективности работа энергосберегающих электромеханических стендов для испытаний двигателей внутреннего сгорания. Рассматриваются методы повышения энергоэффективности работа испытательных стендов. Описан метод модернизации испытательных стендов. Рассмотрены принципиальные схемы этих модифицированных испытательных стендов. Детально описан принцип работы модифицированных испытательных стендов. Приведены положительные и отрицательные стороны модификаций испытательных стендов. Обоснована задача создания математических моделей испытательных стендов для дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** двигатели внутреннего сгорания, испытательные стенды, частотный преобразователь, генератор с постоянным магнитом, асинхронный генератор, машина постоянного тока, асинхронизированный синхронный генератор.

УДК 621.315:621.3.048

**Влияние гидрофобизации изоляторов на распределение напряжения по их поверхности / П. Е. Пономарев, А. П. Пономарева // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 63-68. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349**

Гидрофобные покрытия как одно из средств защиты наружной изоляции от перекрытий при загрязнениях стали применять еще в довоенное время, однако всестороннее исследование их свойств и широкое внедрение в практику начато только в шестидесятые годы. Наибольшее распространение эти покрытия находят на загрязняемых подстанциях, значительно реже они применяются на участках ВЛ, хотя и здесь намечается тенденция к расширению их использования.

**Ключевые слова:** гидрофобизация поверхности, фарфоровые изоляторы, гирлянда изоляторов, распределение напряжения.

УДК 621.314

**Исследование распространения высших гармоник вдоль линии электропередач / Н.В. Рудевич // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – . - № 24 (1067) . – С.69-74 – Бібліогр.4 назви. – ISSN 2224-0349.**

В статье предлагаются результаты исследования распространения высших гармоник вдоль линии электропередач, полученные в результате компьютерной реализации математической модели линии электропередач в фазных координатах. Сравнены формы кривых тока и напряжения в начале и в конце линии. Сделаны выводы о влиянии длины линии, наличии грозозащитного троса на распространение высших гармоник.

**Ключевые слова:** высшие гармоники, математическая модель, линия электропередач, фазные координаты, компьютерное моделирование.

УДК 621.315

**Анализ существующих методов выравнивания напряженности и потенциала вдоль стержня турбогенератора на выходе его из паза статора / С. А. Сокол // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 75-81. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2224-0349**

Приведены существующие методы выравнивания электрического поля на выходе стержня из паза, приведены программные расчеты и построена картина распределения напряженности электрического поля без использования и с применением полупроводящей ленты. Показано влияние неравномерной напряженности поля на изоляцию. Показана возможность возникновения поверхностных и частичных разрядов в зоне неравномерности напряженности электрического поля

**Ключевые слова:** частичный разряд, коронирование, напряженность электрического поля, полупроводящее покрытие.

УДК 678

**Исследование электрофизических свойств композиций на основе поливинилхлорида для изоляции силовых кабелей низкого напряжения / В. Л. Чулеев, В. М. Золотарев, Е. В. Чулеева, С. Ю. Антоненко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24(1067). – С. 82-89. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2224-0349.**

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению электрофизических свойств полимерных композиций на основе поливинилхлорида (ПВХ). Изучены влияния ингредиентов на технологические свойства ПВХ композиций. Определены основные отличия электрофизических свойств материалов изоляции в зависимости от водопоглощения. Разработанные композиции на основе ПВХ для изоляции силовых кабелей низкого напряжения имеют высокие технологические, физико-механические, а также электрофизические характеристики.

**Ключевые слова:** поливинилхлорид (ПВХ), удельное объемное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, время выдержки в воде, водопоглощение, изоляция, полимерная композиция.

УДК 621.315

**Проблемные вопросы выбора и применения полимерной изоляции для воздушных линий электропередачи / Ю. Н. Шумилов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № . 24 (1067) – С.90 – 101. Бібліогр.5 назв. – ISSN 2224-0349.**

В статье показана необходимость корректировки действующей в Украине нормативной документации (НД), касающейся выбора и эксплуатации полимерной изоляции, в частности, по вопросу выбора длины пути утечки в загрязненных районах и по обновлению требований к испытательным напряжениям грозового и коммутационного импульса. Рекомендуются в данной статье скорректированные импульсные испытательные напряжения, а также изоляционная длина полимерных изоляторов позволят обеспечить их более надежную работу в электрических сетях и повысить конкурентоспособность на внешнем и внутреннем рынках.

**Ключевые слова:** линейные полимерные изоляторы, нормативная документация, корректировка, степень загрязнения атмосферы, длина пути утечки, испытательные напряжения, грозовой и коммутационный импульсы.

УДК 621.314

**Анализ законов распределения концентраций газов, растворенных в масле высоковольтных трансформаторов негерметического исполнения / Д. Н. Баклай, О. В. Шутенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – . - № 24 (1067). – С. 102–117. Бібліогр.10 назв. – ISSN 2224-0349.**

Предложен алгоритм статистической обработки результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов, для формирования массивов с однородными концентрациями в условиях априорной неопределенности исходной, измерительной информации. Выполнены исследования законов распределения газов растворенных в масле бездефектных и дефектных трансформаторов. Установлено, что плотности распределений для дефектных и бездефектных состояний пересекаются, а это значит что принципиально не возможно выбрать граничные значения показателей, которые бы не давали ошибочных решений.

**Ключевые слова:** хроматографический анализ, развивающийся дефект, статистическая обработка, законы распределения, критерии согласия.

УДК 621.315.2

**Критерий выбора коэффициента промещения света для полимерных оболочек оптического волокна / Л.А. Щепенюк, О.И. Петренко, И.И. Удовенко, // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 118-122. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2224-0349**

Выполнен анализ результатов сравнения свойств кабельных полимеров для применения в оптических кабелях. Различные фирмы производители оптического волокна предлагают использование оптического волокна с различными коэффициентами преломления  $n_1$ . При этом возникает вопрос о соответствующем выборе коэффициента преломления  $n_2$  для полимерной оболочки, поскольку разность  $n_1 - n_2$  определяет большинство эксплуатационных характеристик оптического кабеля.

**Ключевые слова:** кабельные полимеры, коэффициент преломления, параметры оптического волокна

УДК 621.315.2

**К анализу зависимости механического напряжения от времени одноосного растяжения для образцов высоконаполненных антипиренами ПВХ-пластикатов / Л.А. Щепенюк, С. Я. Рябинин, А. И. Стурченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 24 (1067). – С. 123-128. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2224-0349**

Выполнен анализ результатов сравнения механических свойств наполненного ПВХ-пластиката, для которых обеспечение требований пожарной безопасности диктует рецептуры ПВХ-пластикатов, предназначенных для изоляции, оболочек и внутреннего заполнения кабелей. В частности, высокое значение кислородного индекса, низкое значение параметра дымообразования и выделения хлористого водорода, а также пониженная токсичность продуктов горения

**Ключевые слова:** ПВХ-пластикат, антипирен, механическая прочность, время

## ABSTRACTS

**Calculation of electric field tension in insulation of enamelled wire based on copolymer polyimide / S. Ju. Antonec, L. A. Shhebenjuk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P. 3-10. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349**

New to the domestic industry enamelled wire with insulation of polyimide copolymers have very high electrical characteristics, including a high level of breakdown voltages. There was a question about the influence of local inhomogeneities on the surface of the wire on breakdown voltage as the breakdown voltage variations in the breakdown voltage in enamelled wire is significant. The modeling of the electric field in enamel insulation is estimated size of the stress concentration around the defect surface of the conductor. Analytic construction of equipotential allowed to simulate the electric field in enamel insulation, estimate the size of the area of stress concentration around the defect surface of the conductor. Tensions along the equipotential decreases rapidly, and the area of stress concentration around the surface defect is less than 2 microns. The construction of equipotential also allows to evaluate the impact of the size of inhomogeneities on the electric field in enamel insulation.

**Keywords:** enameled wire, defect of copper wire, electric field strength.

**Estimation of environment contamination casual processes parameters the power enterprises / S. F. Artjuh, N. A. Ljubimova // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P.11-16. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349**

The estimation of contamination casual processes parameters of environment power enterprises is executed in the article, the analysis of contamination processes realization, and also analysis of histograms, distributing of contamination processes values, is conducted. The point estimations of contamination casual processes numerical descriptions are presented on components: «dust», «SO<sub>2</sub>», «NO<sub>x</sub>», «CO», «O<sub>2</sub>». The analysis of contamination processes realization shows that in them, along with the single extreme troop landings, low frequency pseudoharmonic constituents are present. The analysis of histograms, distributing of contamination processes values, specifies on the obvious difference of distributing laws of these values from the law of Gauss. This difference is confirmed by the estimates of the values of the numerical characteristics of pollution processes.

**Keywords:** contamination of atmosphere, distributing law, treatment, component of atmospheric contamination.

**Real opportunities of wind energy in Ukraine/Ju. V. Vladimirov, E. Je, Pilipenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P. 17-21. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2224-0349**

The paper presents the research and the real estimate of the possibilities of wind energy in Ukraine. In recent years, wind power in Ukraine is actively developing. Shown results of the development of wind energy in Ukraine during the first ten years and made an analysis of the reasons for its erroneous development. Introduced the concepts theoretical and the actual technical potential of wind energy, as well as the coefficient of economic opportunities. By technical potential means the possibility install on every available hectare country megawatt-class wind turbines based on the weighted average wind speed by region and average time of use of installed capacity windfarm. Show the map the weighted average of wind speeds in regions of Ukraine. According to official statistics of wind farms are predicted and actual average annual capacity factor of wind farms in different regions of Ukraine. Calculate possible total electricity production wind electric stations of Ukraine taking into account the actual technical capacity and the coefficient of economic opportunities. Is concluded that in the next

twenty years wind power of Ukraine can not play a significant role in the energy market. Necessary to increase the investment in wind energy in Ukraine for its further successful development.

**Keywords:** wind power, wind turbine, potential, electric power generation.

**Analysis and selection of electrochemical batteries for power plants long-lived spacecraft / V/ V/ Gasanova, Ju. G. Katorgina, Ja, A. Stoljarov, E. G. Chechina // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P.22-32. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2224-0349**

This article is devoted to the analysis and selection of electrochemical energy storage for spacecrafts. The analysis of the types of batteries used in power plants spacecraft are did. The recommendations regarding the choice of an electrochemical system for spacecraft life of more than 10 years is makes. The cost of the power system by using different types of batteries is calculation. It is shown that the most optimal from the standpoint of cost trigger type electrochemical batteries are lithium-based system. While lithium-ion batteries have a high specific capacity, providing an essential resource of spacecraft. The calculation of the cost of the power system by using different types of batteries. It is shown that the most optimal from the standpoint of cost trigger type electrochemical batteries are lithium-based system.

**Keywords:** power service, accumulator, battery, spacecraft, orbit

**Deterioration of the wetted surface layer of polymer insulation during high-voltage surges / A. G. Gurin, Ju. G. Gontar' // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P.33-39. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2224-0349**

Expanding production of insulating structures with polymeric insulation and, primarily, cable products, accompanied by intensive study of the aging process of this type of insulation during operation. The results of experimental studies of the process of surface discharge in dry and moist surface of the polymer for the isolation of the electrodes' needle-plane, when exposed to overvoltage pulses of positive polarity. The influence of hydration on the surface of the insulation zone fracture surface sharpening front affecting voltage pulses in a layer of moisture, creating the conditions for the growth of dendrites in the water places the formation of surface discharge. The proposed method for determining the fracture energy in the breakdown of the dielectric by determining the weight of the electrode metallization layer can be used for qualitative assessment of the processes studied.

**Keywords:** surface discharge, wetted surface, high-voltage pulses surge.

**Simulation modeling hit long spark in the point in the plane in a nonuniform field / A.O. Kuksov, A.A. Petkov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P.40-49. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2224-0349**

One aspect of ensuring the reliability of the deepening of equipment just below the soil surface (equipment depots, communications) is the study of patterns of distribution points of the final defeat of the lightning discharge. The paper proposes a two-step simulation model hit long spark in a plane. The adequacy of the developed model is confirmed. Adequacy test was carried out at each step of the model. The results of numerical simulation of random process hit a long spark in the plane are submitted. The comparison of the results of modeling the density distribution of the points of defeat with the experimental data is produced. The parameters of the model, which provide a minimum deviation of the calculated and experimental data, are identified.

**Keywords:** numerical simulation, electrical discharge, frequency distribution.

**In relation to determination of electric energy cost for domestic users / O.P. Lazurenko, G.I. Cherkashina** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P.50-55. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2224-0349

The mechanism of retail tariff forming is in-process considered on electric energy for domestic consumers. Factors that directly influence on the size of tariff are educed, namely unevenness of electric energy consumption for a day long, partition of load on the phase wires of the power supply system. Cited data on the consumption of electric energy the lodgers of nine-storeyed dwelling-house equipped by gas-stoves. An economically reasonable tariff is certain on electric energy for the consumers of nine-storeyed dwelling-house, and also size of volume of grants from the side of the state. On results a calculation, understating of operating tariff is educed more than in four times as compared to economically reasonable. Also to the article recommendations are driven concerning differentiation of tariff on electric energy for domestic consumers.

**Keywords:** domestic user of electric energy, retail tariff on electric energy, normative technological losses, variable calculation losses, de bene esse permanent losses.

**Methods for constructing of electromechanical energy saving engine test benches of internal combustion / G. I. Mel'nikov, A. O. Korotkov** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P.56-62. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349

The problem of increasing energetic efficiency of internal-combustion engines' electromechanical stands has been considered in the given study. Ways of increasing energetic efficiency of testing stands are discussed. It was specified the method of testing stands' modernization. Principal schemes of these modified testing stands have been reviewed. Operating principle of modified stands has been described in detail. Positive and negative sights of testing stands' modifications were showed. The task of creating mathematical models of testing stands for the further investigations was reasoned. The main advantage of all test stands is the ability to transfer energy generated industrial enterprise network, which in turn, allows you to save part of the money spent on the test.

**Keywords:** internal combustion engines, test stands, inverter, generator of permanent magnets, asynchronous generator, the machine DC asynchronous synchronous generator

**Effect of hydrophobic coating on the voltage distribution in a garland of insulators / P. E. Ponimarev, A. P. Ponimareva** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P.63-68. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2224-0349

Hydrophobic coatings as a means of protection from external insulation slabs when pollution began to be used before the war, but a comprehensive study of their properties and a broad introduction to the practice only began in the sixties. The most widespread of these coatings are polluted on substations, much less they are used on overhead areas, although there is a tendency to increase their use. Application of hydrophobic insulators in areas of elevated atmospheric and chemical pollution power plants of Ukraine showed its effectiveness. However, the most promising direction is the use of solid hydrophobic coatings. Cover in the form of solid films is durable coatings and can be operated for extended periods. Atmospheric and chemical influence in conjunction with contamination cause oxidation reactions resulting in hardening of the coating and loss of the hydrophobic properties

**Keywords:** waterproofing of surfaces, porcelain insulators, garland insulators, voltage distribution.

**Study the spread of higher harmonics along the power lines / Rudevich N.** Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P.69-74. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2224-0349

In the article the relevance of studying the spread of higher harmonics in the power system elements. The expediency of the use of mathematical models of the elements in the phase coordinates to obtain instantaneous values of currents and voltages. Presents the results of studying the spread of higher harmonics along power lines, resulting from the implementation of a mathematical model of computer power lines in the phase coordinates with all the influencing factors. Computer modeling was performed using the package Simulink environment Matlab. Compared the shape of current and voltage waveforms at the beginning and end of the line. Analyzed the harmonic spectrum of the signal of the capacitive leakage current phase line. Conclusions about the impact of the line length, the presence of ground wire on the distribution of higher harmonics.

**Keywords:** high harmonics, power line, mathematical model, power line, phase coordinates, computer simulation.

**Analysis of existent methods of smoothing of tension and potential along the bar of turbogenerator on the exit of him from the slot of stator / S. O. Sokol** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P.75-81. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349

The existent methods of smoothing of the electric field are resulted in the areas of enhanceable tension and on the exit of bar from to the slot, programmatic calculations and built picture of distributing of tension of the electric field are resulted without the use and with the use of semileading ribbon. Considered possibilities of graduvannya isolation and possibility of origin of superficial and partial digits is rotined in the area of uneven tension of the electric field. The necessity of application of semiconducting ribbon is proved. The lack of other existent methods of smoothing of tension of the electric field is grounded. The special attention is spared on the exit of a bar from a slot. Regulation of the electric field using conductance is done by increasing the conductance of individual sections of insulation, which leads to a decrease in the voltage drop across them, and electrical-resistance of construction, but increases dielectric loss.

**Keywords:** partial digit, coronation, tension of the electric field, semileading coverage.

**Research of electrophysics properties of compositions on the basis of PVC for the isolation of low voltage energy cables / Chuleyev V.L., Zolotaryov V.M., Chuleyeva O.V., Antonets S.Yu.** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P.82-89. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2224-0349

Polyvinyl chloride (PVC) is one of the most famous and important practical tonnage polymer products. On its basis, receive semi-soft and soft (plasticized) polymer compositions used in the manufacture of cables and wires. The main problem of PVC is its very low stability.

The aim of this work was to study the electrical properties of PVC insulation compositions for low-voltage power cables. The results of theoretical and experimental researches are represented on determination of electrophysics properties of polymeric compositions on the basis of PVC. Influences of ingredients are studied on technological properties of PVC compositions. The basic differences of electrophysics properties of materials of isolation are certain depending on moisture absorption. Compositions developed for the

isolation of the low voltage power cables have high technological, physical, mechanical, and electrical characteristics.

**Keywords:** PVC, specific by volume electric resistance, dielectric permeability, tangent of corner of dielectric losses, time of self-control, in water, moisture absorption, isolation, polymeric composition.

**Problem questions of choice and application of polymeric insulation for air power lines / Ju. N. Shumilov** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P. 90–101. Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349

The article shows the necessity of correcting the existing Ukrainian normative documents (ND) relating to the selection and operation of polymeric insulation, in particular, on the choice of the leakage distance in the contaminated areas, and to update the requirements to the test voltage lightning and switching impulse. The article presents the calculated and experimental data voltage pulse discharge in dry conditions and the rain

Featured in this article corrected impulse test voltage and insulation length of polymer insulators will provide more reliable work in electric networks and increase competitiveness on the internal and external markets.

**Key words:** line polymer insulators, normative documents, correction, the degree of air pollution, leakage distance, test voltage, lightning and switching impulses.

**The analysis of laws of distribution of concentration of the gases dissolved in oil of high-voltage transformers of not hermetically sealed execution / O. V. Shutenko, D. N. Baklaj** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P. 102–117. Bibliogr.: 10. – ISSN 2224-0349

Proposed the algorithm of statistical processing of results chromatographic the analysis of the gases dissolved in oil, for formation of files with homogeneous concentration in the conditions of aprioristic uncertainty of the initial, measuring information. The studies of the laws of distribution of gases dissolved in the oil free of defects and defective transformers. It is established that for investigated transformers, not hermetically execution, distribution of concentration of gases, can be described distribution Weibull. Performed analysis showed that the density distributions for the defective and defect-free states intersect, which means that in principle not possible select the boundary values of parameters that would not give wrong decisions. And, hence, for definition of boundary concentration, it is necessary to use methods of statistical solutions, for example a method of the minimum number of erroneous solutions, a minimax method, a method of the minimum risk.

**Keywords:** chromatographic analysis, developing defect, distribution laws, goodness of fit.

**Selection criteria for refractive index of polymer shells of optical fiber / L. A. Shhebenjuk, O. I. Petrenko, I. I. Udovenko** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P. 118–122. Bibliogr.: 2. – ISSN 2224-0349

In the design and selection of the cable polymeric materials, in selecting the optimum material for a particular promeniya always a problem limiting the spectrum of material parameters. The analysis of the results of the comparison of cable properties of polymers for

use in optical cables is presented. Various company manufacturers suggest the use of optical fiber optical fiber with different refractive index  $n_1$ . This raises the question of choosing the appropriate refractive index  $n_2$  for the polymeric shell as the difference  $n_1 - n_2$  defines the majority of operating characteristics of the optical cable. For branched chains optical network for a given value of the refractive index the range of values for the refractive index of the polymer shell tapers rapidly increasing branching.

**Keywords:** cable polymers, refractive index, optical fiber parameters.

**Analysis of time dependence of mechanical stresses uniaxial tensile sample of highly plasticized PVC flame retardants / L. A. Shhebenjuk, S. A. Rjabinin, A. I. Sturchenko** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 24 (1067). – P. 123-128. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2224-0349

To ensure fire safety requirements of electrical cables designed plasticized PVC formulations intended for insulation, membranes and internal filling cables. Such formulations must be developed with a higher oxygen index and lower toxicity of combustion products.

The analysis of the results of the comparison of mechanical properties of filled flexible PVC, for which provision of fire safety requirements dictate plasticized PVC formulations intended for insulation, membranes and internal filling cables is presented. In particular, the high oxygen index, low smoke generation and parameter value selection chloride conduit. Experimental evaluation of the internal friction coefficient provides additional information on the processes of deformation and fracture of highly filled plastic compound in uniaxial tension. To select the technological parameters of processing PVC compounds filled with flame retardants, and search the optimal composition of multicomponent structures in cable production is necessary to monitor the mechanical characteristics of the respective samples of composite materials.

**Keywords:** PVC plastic, flame retardant, mechanical strength, time.



ЗМІСТ

<b>АНТОНЕЦ С. Ю., ЩЕБЕНЮК Л. А.</b> К расчету электрического поля в изоляции эмалипровода с изоляцией на основе полиимидных сополимеров.....	3	<b>ЩЕБЕНЮК Л.А., ПЕТРЕНКО О.И., УДОВЕНКО И.И.</b> Критерий выбора коэффициента преломления света для полимерных оболочек оптического волокна.....	118
<b>АРТЮХ С.Ф., ЛЮБИМОВА Н. А.</b> Оценка параметров случайных процессов загрязнения окружающей среды энергетическими предприятиями.....	11	<b>ЩЕБЕНЮК Л.А., РЯБИНИН С.А., СТУРЧЕНКО А.И.</b> К анализу зависимости механического напряжения от времени одноосного растяжения для образцов высоконаполненных антипиренами ПВХ-пластиков.....	123
<b>ВЛАДИМИРОВ Ю. В., ПИЛИПЕНКО Е. Э.</b> Реальные возможности ветроэнергетики Украины.....	17		
<b>ГАСАНОВА В. В., КАТОРГИНА Ю. Г., СТОЛЯРОВ Я. А., ЧЕЧИНА Е. Г.</b> Анализ и выбор электрохимических аккумуляторов для энергоустановок долго живущих космических аппаратов.....	22		
<b>ГУРИН А.Г., ГОНТАРЬ Ю. Г.</b> Разрушение увлажненного поверхностного слоя полимерной изоляции при грозовых перенапряжениях.....	33		
<b>КУКСОВ А.О., ПЕТКОВ О. О.</b> Імітаційне моделювання влучення розряду довгої іскри в точки площини в неоднорідному полі.....	40		
<b>ЛАЗУРЕНКО О.П., ЧЕРКАШИНА Г.І.</b> Щодо визначення вартості електричної енергії для побутових споживачів.....	50		
<b>МЕЛЬНИКОВ Г.И., КОРОТКОВ А. О.</b> Способы построения энергосберегающих электромеханических стэндов для испытания двигателей внутреннего сгорания.....	56		
<b>ПОНОМАРЕВ П. Е., ПОНОМАРЕВА А. П.</b> Влияние гидрофобизации изоляторов на распределение напряжения по их поверхности.....	63		
<b>РУДЕВИЧ Н.В.</b> Дослідження розповсюдження вищих гармонік уздовж лінії електропередач.....	69		
<b>СОКОЛ С. О.</b> Аналіз існуючих методів вирівнювання напруженості і потенціалу вздовж стрижня турбогенератору на виході його із пазу статора.....	75		
<b>ЧУЛЕЕВ В. Л., ЗОЛОТАРЕВ В. М., ЧУЛЕЕВА Е. В., АНТОНЕЦ С. Ю.</b> Исследование электрофизических свойств композиций на основе поливинилхлорида для изоляции силовых кабелей низкого напряжения.....	82		
<b>ШУМИЛОВ Ю.Н.</b> Проблемные вопросы выбора и применения полимерной изоляции для воздушных линий электропередачи.....	90		
<b>ШУТЕНКО О. В., БАКЛАЙ Д. М.</b> Аналіз законів розподілу концентрацій газів, розчинених у маслі високовольних трансформаторів негерметичного виконання.....	102		

