

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

**ВІСНИК**  
**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**  
**«ХПІ»**

*Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*

№ 31, (1253) 2017

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2017

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 31 (1253). – 130 с

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Мова статей – українська, російська, англійська.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Наказом МОН України №1328 від 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії*

*У квітні 2013 р. Вісник НТУ«ХПІ» Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA).*

**Координаційна рада:**

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** А. Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.

**Заст. відповідального редактора:** О. С. Куценко, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** С. О. Федорчук, аспірант.

**Члени редколегії:** Є. Бондаренко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Безпрозваних, д-р техн. наук,

проф.; Ю. М. Вєпрік, д-р техн. наук, проф.; О. Г. Гриб, д-р техн. наук, проф.; Г. А. Сендерович, д-р

техн. наук, проф.; О. П. Лазуренко, канд. техн. наук, проф.; К. В. Махотіло, канд. техн. наук, доц.;

С. Ю. Шевченко д-р техн. наук, проф.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 8 від 27.10.2017 р.

УДК 629.78.064.5

*А. Л. АЗАРНОВ, К. В. БЕЗРУЧКО, В. И. ЛАЗНЕНКО, С. В. СИНЧЕНКО, А. А. ХАРЧЕНКО***ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРОВ  
ЭНЕРГОУСТАНОВОК ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Розглянуто суть методу експрес-діагностики електрохімічних акумуляторів. Приведені результати експериментального дослідження нікель-кадмієвого акумулятора НК-125 при різних ступенях зарядженості. Представлені основні результати експериментальних досліджень нікель-кадмієвих акумуляторів, які ввійшли до математичної моделі визначення стану електрохімічних акумуляторів в складі енергоустановки. Побудовано математичну модель для діагностування електрохімічного акумулятора. Проведено порівняння результатів розрахунків з експериментальними результатами.

**Ключові слова:** електрохімічний акумулятор, діагностування, енергоустановка, математична модель, вольт-амперна характеристика, розрядна характеристика

Рассмотрено сущность метода экспресс-диагностики электрохимических аккумуляторов. Приведены результаты экспериментального исследования никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 при различных степенях заряженности. Представлены основные результаты экспериментальных исследований никель-кадмиевых аккумуляторов, вошедшие в математическую модель определения состояния электрохимических аккумуляторов в составе энергоустановок подвижных объектов. Построена математическая модель для диагностирования электрохимического аккумулятора. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными результатами.

**Ключевые слова:** электрохимический аккумулятор, диагностирование, энергоустановка, математическая модель, вольт-амперная характеристика, разрядная характеристика

Essentiality of method of express-diagnostics of electrochemical accumulators is considered. The results of experimental studies of nickel-cadmium batteries with different charge level shown. Rapid diagnosis base on the impact on the battery variables in the sign of the current pulses, allows you to define the parameters and characteristics of the battery in a short time, on a range of parameters and without interfering with the battery operation. The main experimental results of nickel-cadmium batteries are presented. These results were included in the mathematical model of determining the state of the electrochemical batteries as a part of power plants. A mathematical model for the diagnosis of an electrochemical battery is built. The comparison of the calculation results with the experimental results conducted.

**Keywords:** electrochemical battery, diagnostics, energy installation, mathematical model, the current-voltage characteristic, breakdown characteristic

**Введение.** Электрохимические накопители энергии являются одним из наиболее критичных элементов в составе современных энергоустановок подвижных объектов.

Для диагностического контроля технического состояния электрохимических аккумуляторов энергоустановок подвижных объектов применяются методы, требующие демонтажа электрохимических аккумуляторов с объекта, с последующим проведением комплекса работ на специализированных станциях. Контроль параметров электрохимических аккумуляторов в процессе эксплуатации на объекте не осуществляется, что может привести к сбоям в его работе.

Таким образом, возникает необходимость в разработке метода и средств диагностического контроля технического состояния электрохимических аккумуляторов энергоустановок подвижных объектов без прекращения работы энергоустановки и всего объекта в целом.

**Постановка задачи.** В настоящей работе представлены основные результаты экспериментальных исследований по созданию методики импульсной экспресс-диагностики энергоустановок подвижных объектов.

Основной целью данной работы, являлось разработка метода экспресс-диагностики энергоустановок подвижных объектов за короткое время в штатном режиме работы и без прекращения функционирования энергоустановки. Сущность разработа-

ваемого метода заключается в воздействии на аккумулятор специальной последовательностью импульсов тока, измерении и анализе отклика по напряжению и определении основных параметров аккумулятора с помощью математических моделей [1–4].

**Условия проведения экспериментальных исследований и стенд для исследований.** Все экспериментальные исследования проводились на никель-кадмиевых аккумуляторах НК-125 и включали в себя 2 основных этапа:

- получение характеристик нового аккумулятора;
- получение ряда характеристик аккумулятора при различных степенях заряженности аккумуляторов.

В рамках программы эксперимента предусмотрено воздействие на аккумулятор пакета знакопеременных импульсов тока, а с целью контроля полученных результатов, проведение прямого заряда и прямого разряда постоянным током.

Режимы этих воздействий характеризуются следующими параметрами:

- токи заряда и разряда - 12,5 А;
- знакопеременные пакеты импульсов тока - 0... ±120 А, с шагом 5 А.

Структура стенда для проведения исследований представлена на рис. 1, а внешний вид стенда представлен на рис. 2 [5].

Получаемых данных достаточно для построения вольт-амперной характеристики электрохими-

ческого аккумулятора. Для определения значений остальных параметров состояния аккумуляторов, используется математическая модель.



Рис. 1 – Структурная схема стенда для исследований

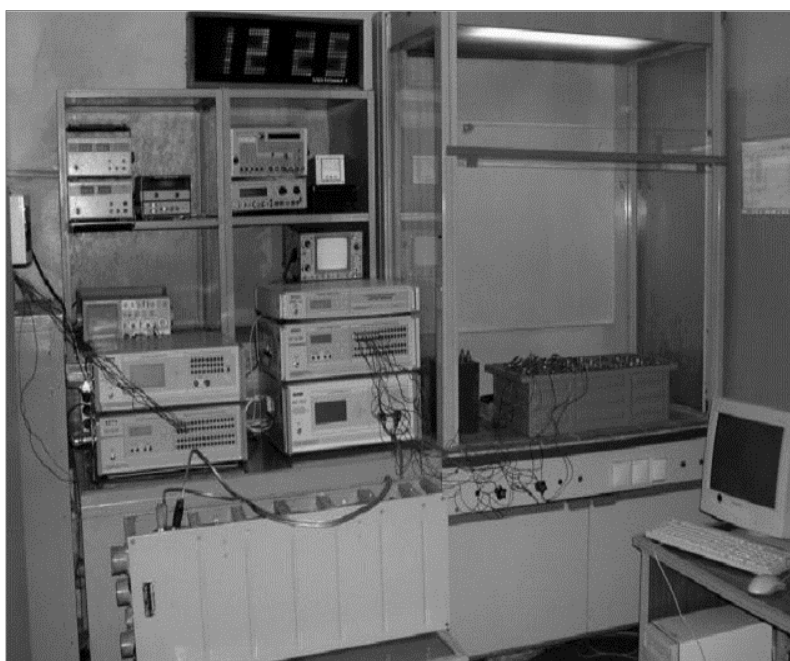


Рис. 2 – Внешний вид стенда для исследований

**Экспериментальное исследование нового никель-кадмиевого аккумулятора.** Для построения вольт-амперной характеристики, на аккумулятор подавались пакеты прямоугольных импульсов тока (переменных как по величине, так и по знаку) (рис. 3а) и снимались отклики по напряжению (рис. 3б). После обработки данных была построена вольт-амперная характеристика нового полностью заряженного никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 (рис. 4).

Однако, полученных данных не достаточно для построения математической модели никель-кадмиевого аккумулятора. Необходимо проведение дополнительных исследований аккумуляторов при различных степенях заряженности, для уточнения коэффициентов входящих в математическую модель.

**Экспериментальное исследование никель-кадмиевого аккумулятора при различных степенях заряженности.** Далее аккумуляторы подвергались

воздействию одинаковых пакетов импульсов тока, каждый из которых состоял из восьми различных по величине значений тока. Воздействие одного пакета импульсов тока снижало емкость аккумулятора примерно на 7,0 А·ч.

Пример такого пакета импульсов тока представлен на рис. 5а, а отклики по напряжению представлены на рис. 5б.

Количество пакетов импульсов тока зависит от состояния аккумулятора, и равнялось такому количеству, которое приводит к полному разряду аккумулятора. Для каждого единичного пакета импульсов тока и аналогичного пакета откликов по напряжению строятся вольт-амперные характеристики.

Данные вольт-амперные характеристики в дальнейшем будут использованы для построения математической модели.

Отклики по напряжению и вольт-амперные характеристики нового никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 представлены на рис. 6. Далее прове-

дены исследования никель-кадмиевых аккумуляторов при различных степенях заряженности. Отклики по напряжению и вольт-амперные характеристики

ки никель-кадмиевого аккумулятора при этих исследованиях представлены на рис. 7.

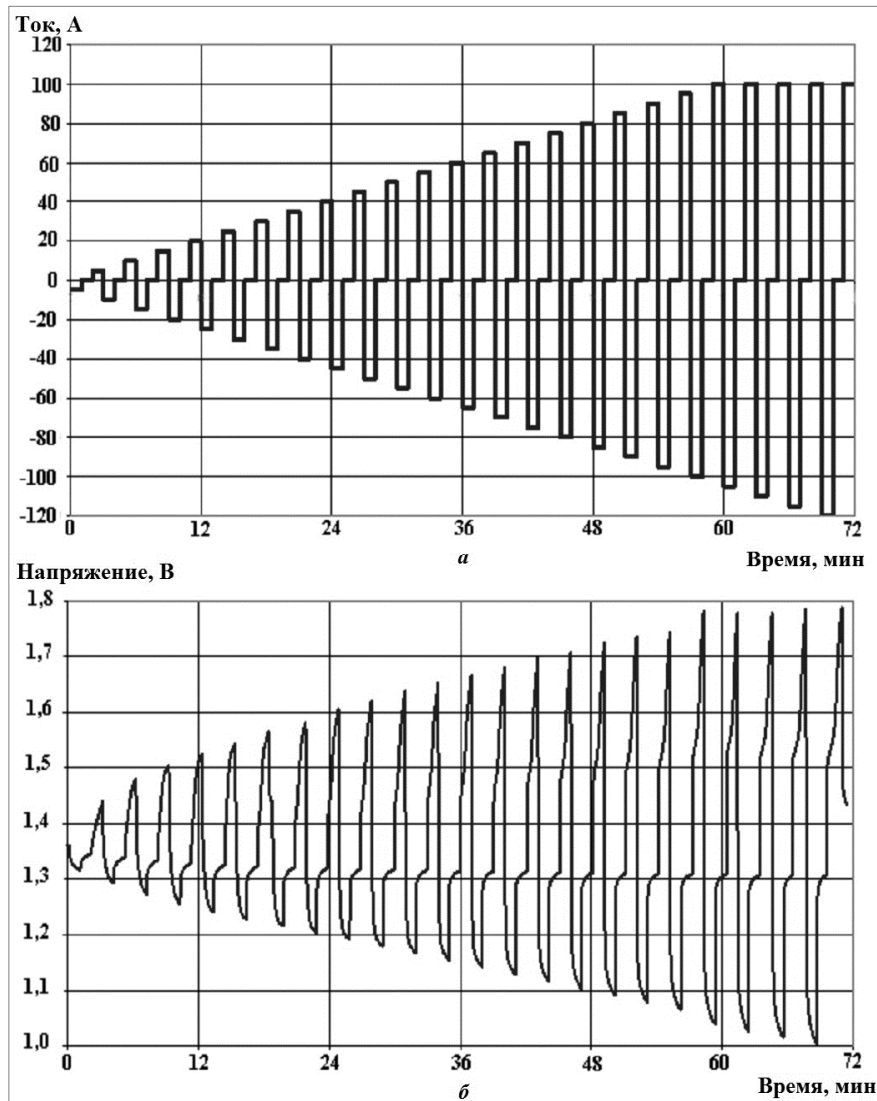


Рис. 3 – Результаты экспериментального исследования нового никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 при нормальных условиях:

*a* – импульсы тока, воздействующие на аккумулятор; *б* – отклики по напряжению на пакеты импульсов тока

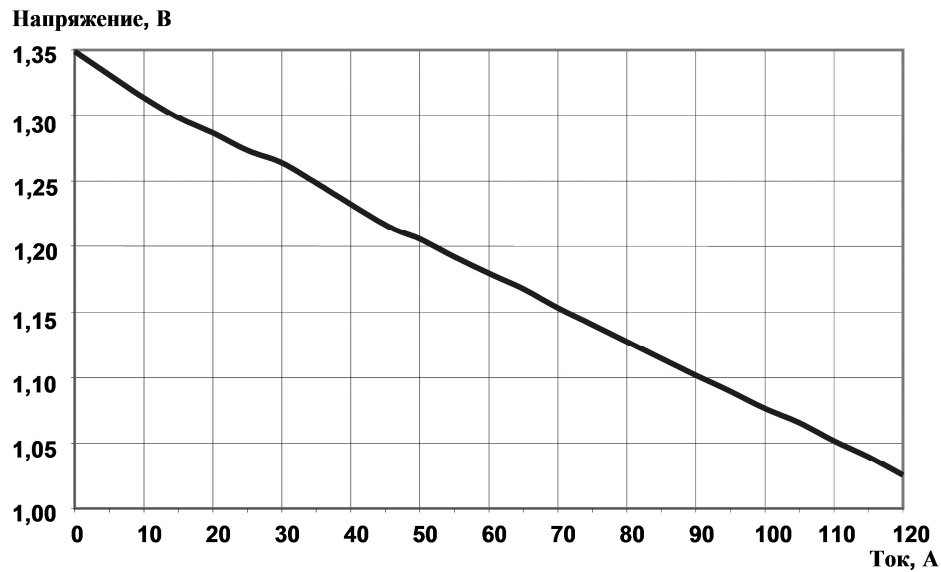


Рис. 4 – Вольт-амперная характеристика полностью заряженного никель-кадмиевого аккумулятора НК-125

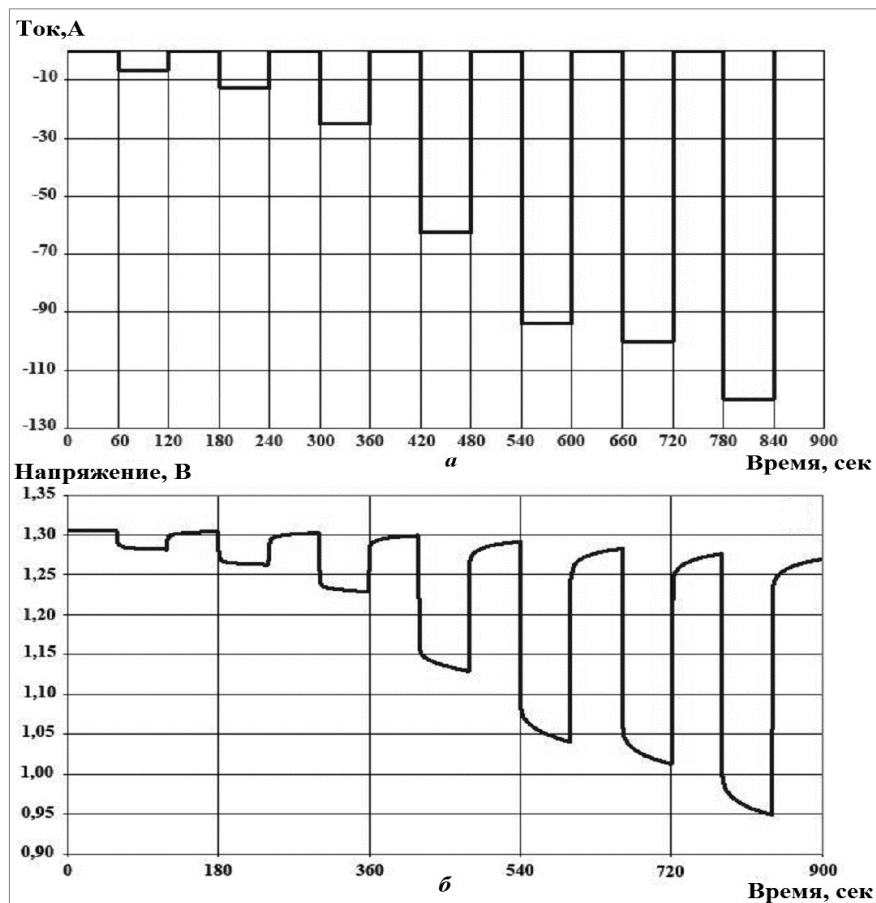


Рис. 5 – Результаты экспериментального исследования никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 при различных степенях заряженности в нормальных условиях:

*a* – единичный пакет импульсов тока воздействующих на аккумулятор; *б* – единичный пакет откликов по напряжению аккумулятора

**Построение диагностической математической модели электрохимического аккумулятора.** Структура диагностической математической модели электрохимического аккумулятора показана на рисунке 8 [6].

Блок 1 в структуре математической модели описывает зависимости параметров состояния электрохимического аккумулятора от формы вольт-амперной характеристики, которая в виде таблиц напряжений и токов является входными параметрами блока 1 математической модели.

Полученные с помощью блока 1 параметры состояния электрохимического аккумулятора являются выходными параметрами диагностической математической модели электрохимического аккумулятора и используются в качестве специфических параметров блока 2 модели.

Блок 2 в структуре математической модели описывает разрядную характеристику электрохимического аккумулятора с учетом его состояния.

Уравнения блока 1 были получены эмпирически по результатам проведенных экспериментальных исследований.

Заряженность аккумулятора НК-125 можно определить по величине напряжения разомкнутой цепи с помощью выражения:

$$q = k_1 \cdot U_0 - k_2 \cdot e^{k_3 \cdot U_0} + k_4, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – эмпирические коэффициенты;

$U_0$  – ЭДС электрохимического аккумулятора, В.

Зависимость разрядной емкости аккумулятора НК-125 от его внутреннего сопротивления имеет вид:

$$Q = k_5 \cdot r^{k_6} + k_7 \cdot r + k_8, \quad (2)$$

где  $k_5, k_6, k_7, k_8$  – эмпирические коэффициенты;  
 $r$  – постоянная составляющая активного внутреннего сопротивления электрохимического аккумулятора, Ом.

Таким образом, емкость полностью заряженного аккумулятора связана с заряженностью и разрядной емкостью выражением:

$$Q_0 = \frac{Q}{q}, \quad (3)$$

где  $Q$  – разрядная емкость, А·ч;  
 $q$  – заряженность аккумулятора.

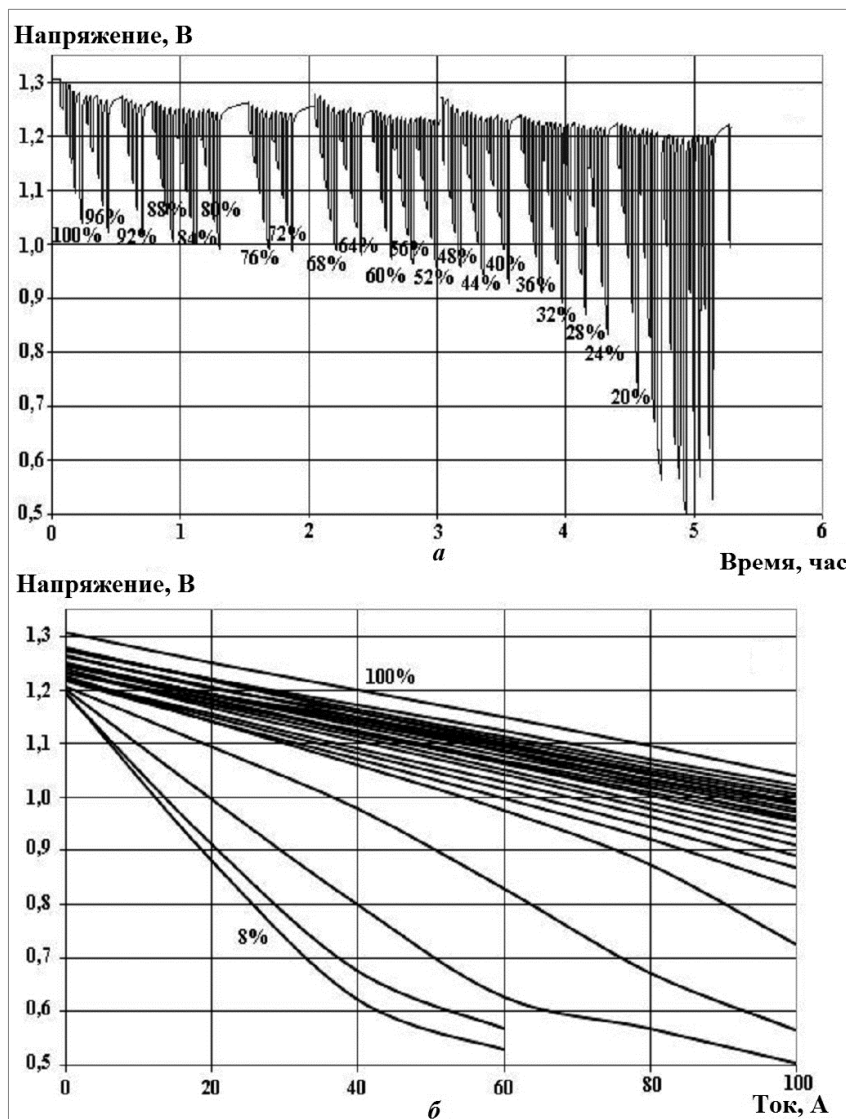


Рис. 6 – Результаты экспериментального исследования нового никель-кадмиевого аккумулятора НК-125 при различных степенях заряженности в нормальных условиях:

$a$  – отклики по напряжению;  $b$  – вольт-амперные характеристики

И блок 1 диагностической математической модели аккумулятора НК-125 можно представить в виде:

$$\begin{cases} q(U_0) = k_1 \cdot U_0 - k_2 \cdot e^{k_3 \cdot U_0} + k_4 \\ U_0 \min \leq U_0 \leq U_0 \max \\ \begin{cases} Q(r) = k_5 \cdot r^{k_6} + k_7 \cdot r + k_8 \\ r \min \leq r \leq r \max \end{cases} \\ Q_0 = \frac{Q(r)}{q(U_0)} \end{cases} \quad (4)$$

Пример расчета заряженности аккумулятора НК-125 в зависимости от напряжения разомкнутой цепи приведен на рис. 9а, а пример расчета разрядной емкости аккумулятора НК-125 от его внутреннего сопротивления на рис. 9б.

Разрядную характеристику аккумулятора (блок 2 модели) в области токов более 0,1С хорошо описывает модифицированное уравнение Шеффера:

$$U(I, t) = U_0 - r \cdot I - k_9 \cdot \left( \frac{I \cdot t}{k_{10} \cdot Q_0 - I \cdot t} \right) \times \left( I + k_{11} \cdot e^{-k_{12} \cdot \frac{I \cdot t}{k_{10} \cdot Q_0 - I \cdot t}} - 1 \right) \quad (5)$$

где  $Q_0$  – полная емкость электрохимического аккумулятора, А·ч;

$I$  – ток разряда электрохимического аккумулятора, А;

$t$  – время, с;

$k_1 - k_{12}$  – эмпирические коэффициенты.

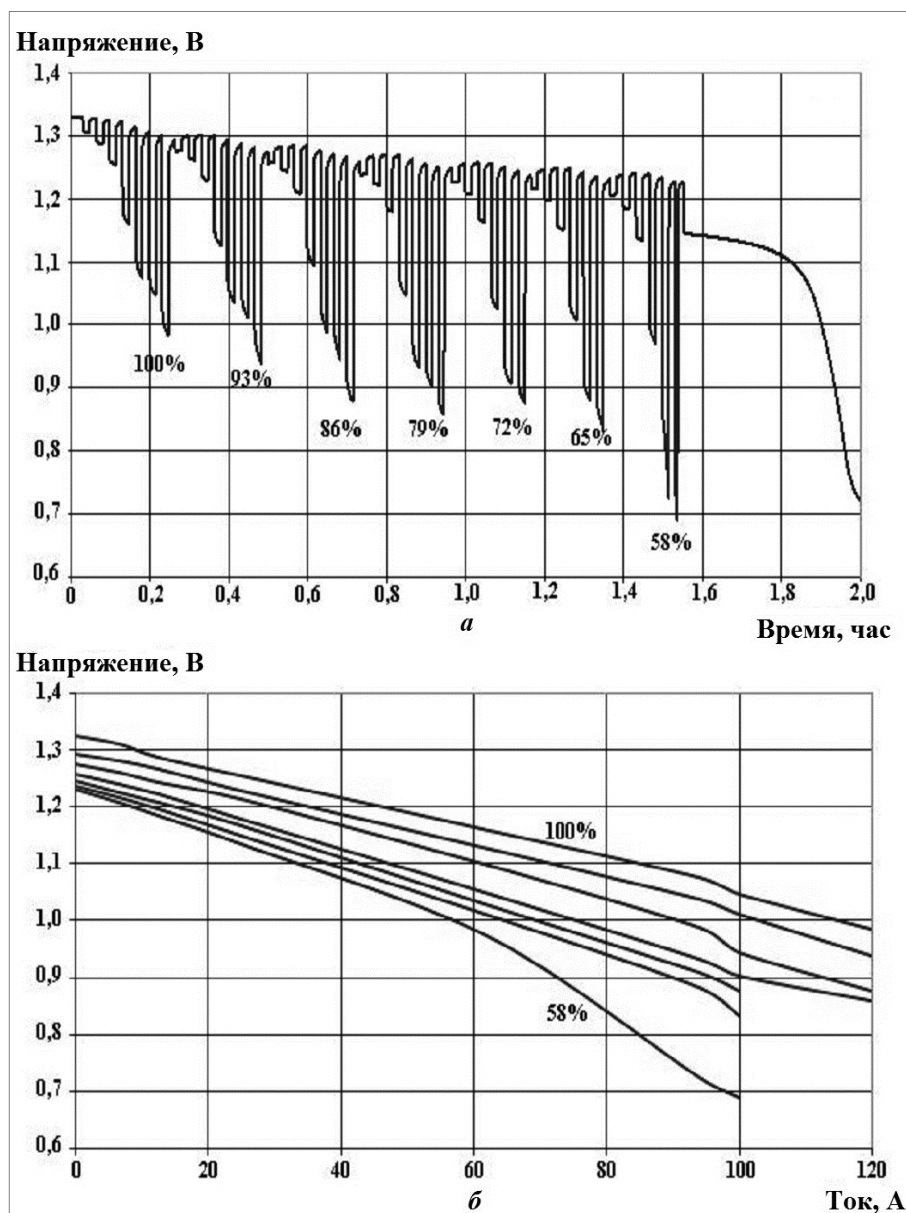


Рис. 7 – Результаты экспериментального исследования никель-кадмиевого аккумулятора НК-125, подверженного деградации, при различных степенях заряженности в нормальных условиях:

$a$  – отклики по напряжению;  $b$  – вольт-амперные характеристики



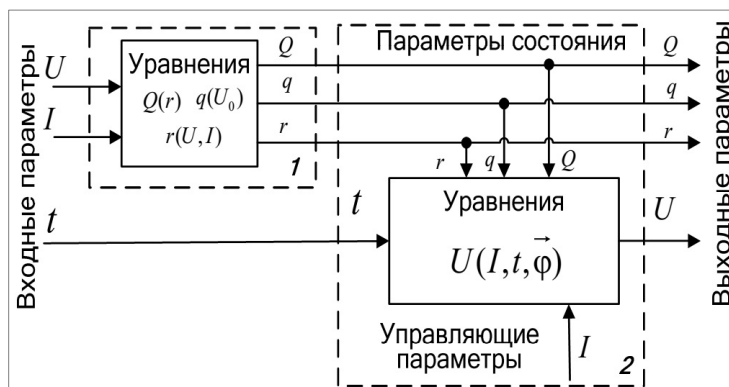


Рис. 8 – Структура математической модели электрохимического аккумулятора

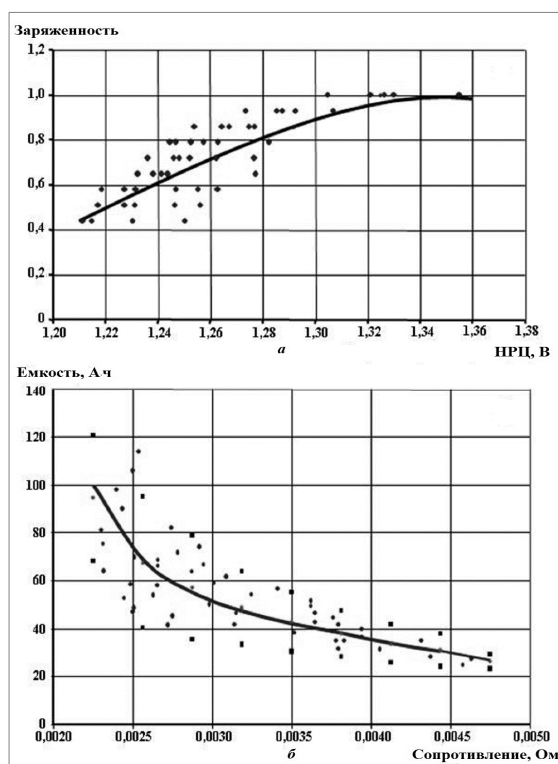


Рис. 9 – Пример расчета:

*a* – зависимости заряженности аккумулятора НК-125 от напряжения разомкнутой цепи; *б* – зависимости разрядной емкости аккумулятора НК-125 от сопротивления

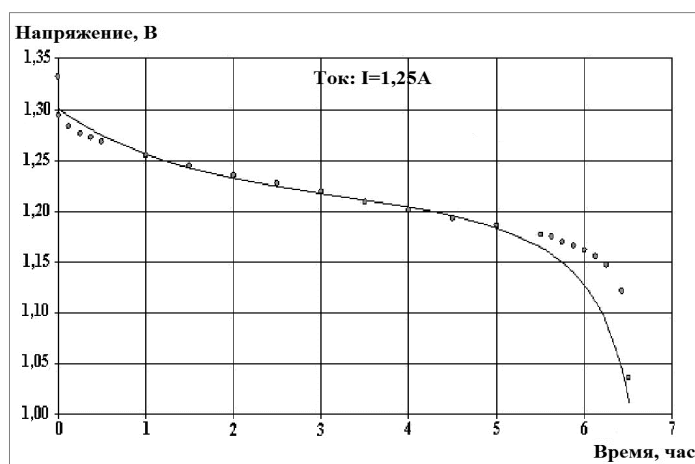


Рис. 10 – Расчетная и экспериментальная разрядные характеристики аккумулятора НК-125

Пример расчетной и экспериментальной разрядных характеристик аккумулятора НК-125 приведен на рис. 10.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований, диагностическую математическую модель аккумулятора НК-125 можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} q(U_0) = k_1 \cdot U_0 - k_2 \cdot e^{k_3 \cdot U_0} + k_4 \\ U_0 \min \leq U_0 \leq U_0 \max \\ Q(r) = k_5 \cdot r^{k_6} + k_7 \cdot r + k_8 \\ r \min \leq r \leq r \max \\ Q_0 = \frac{Q(r)}{q(U_0)} \\ U(I, t) = E - r \cdot I - k_9 \cdot \left( \frac{I \cdot t}{k_{10} \cdot Q_0 - I \cdot t} \right) \cdot I + \\ + k_{11} \cdot \left( e^{-k_{12} \cdot \frac{I \cdot t}{k_{10} \cdot Q_0}} - 1 \right) \end{array} \right. \quad (6)$$

**Заключение.** В работе представлен метод позволяющий определить без проведения разряда электрохимических аккумуляторов или батарей следующие параметры и характеристики: разрядную емкость ( $Q_p$ ), внутреннее сопротивление ( $r$ ), напряжение начала ( $U_{\text{рнач}}$ ) и конца ( $U_{\text{ркон}}$ ) разряда, напряжение разомкнутой цепи ( $U_{\text{прц}}$ ) и ЭДС ( $U_0$ ), вольт-амперную характеристику ( $U=f(I, q)$ ), разрядную характеристику ( $U=f(t)$ ).

Для определения состояния электрохимических аккумулятора или батареи достаточно промежуток времени от 12 до 14 минут.

Погрешность определения разрядной емкости аккумулятора или батареи предложенным методом не превышает 6%.

#### Список литературы

1. Синченко С. В. Теоретические аспекты определения состояния электрохимических аккумуляторов с помощью импульсного воздействия / С. В. Синченко // Вісник Дніпропетровського Університету. – 2008. – №4. Т.16. – С. 140–144. 2. Ширинский С. В. Применение ускоренных испытаний для оценки остаточного ресурса аккумуляторов / С. В. Ширинский, К. В. Безручко // Вісник Дніпропетровського Університету. – 2007. – №9/2. – С. 181–185. 3. Безручко К. В. Диагностика электрохимических аккумуляторов энергоустановок летательных аппаратов / К. В. Безручко, А. О. Давидов, С. В. Синченко, и др. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2009. – № 48. – С. 138–143. 4. Безруч-

ко К. В. Использование экспериментальных вольт-амперных характеристик герметичных свинцово-кислотных аккумуляторов систем электроснабжения стартовых комплексов для экспресс-диагностики этих аккумуляторов / К. В. Безручко, А. О. Давидов, В. И. Лазненко, и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2012. – Вып. 57. – С. 161–167. 5. Азарнов А. Л. Обзор и анализ оборудования для определения технического состояния электрохимических аккумуляторов / А. Л. Азарнов, К. В. Безручко, А. О. Давидов, и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – №4(81). – С. 44–49. 6. Безручко К. В. Сравнение методов построения математических моделей для исследования электрохимических аккумуляторов / К. В. Безручко, С. В. Синченко, А. Л. Азарнов, и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – №7/124. – С. 68–71.

#### References (transliterated)

1. Synchenko S. V. Teoretycheskie aspekty opredeleniya sostoyaniya elektrokhimycheskykh akkumulyatorov s pomoshch'yu impul'snoho vozdeystviya [The theoretical aspects of determining the state of the electrochemical battery with a pulsed exposure]. *Visnyk Dnipropetrovs'koho Unyversytetu*. 2008, no. 4. Vol. 16. pp. 140–144. 2. Shyrynsky S. V. Bezruchko K. V. Prymenenye uskorennykh yspytaniy dlya otsenky ostatochnoho resursa akkumulyatorov [The use of accelerated tests to assess the residual life of batteries]. *Visnyk Dnipropetrovs'koho Unyversytetu*. 2007. no. 9/2. pp. 181–185. 3. Bezruchko K. V., Davydov A. O., Synchenko S. V., Kharchenko A. A., Shyrynsky S. V., Azarnov A. L. Dyahnostyka elektrokhimycheskykh akkumulyatorov enerhoustanovok letatel'nykh apparatov [Diagnosis of electrochemical batteries power plants of aircraft]. *Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta. Ser. Elektroenerhetyka i peretvoryval'na tekhnika*. [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute]. 2009. no. 48. pp. 138–143. 4. Bezruchko K. V., Davydov A. O., Laznenko V. Y., Synchenko S. V., Frolov V. P., Shyrynsky S. V. Ispol'zovanye eksperymental'nykh vol't-ampersnykh kharakterystyk hermetichnykh svyntsovo-kyslotnykh akkumulyatorov system elektrosnabzheniya startovykh kompleksov dlya ekspres-dyahnostyky etykh akkumulyatorov [Using the experimental current-voltage characteristics of the sealed lead-acid batteries launch complexes of power supply systems for the rapid diagnosis of these batteries]. *Otkrytye informatsyonnye i komp'yuternye yntehyrovannye tekhnolohyy: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. in-ta im. N. E. Zhukovskoho «KhAY»*. – Kh., 2012. Vol. 57. pp. 161–167. 5. Azarnov A. L., Bezruchko K. V., Davydov A. O., Laznenko V. Y., Synchenko S. V., Shyrynsky S. V., Kharchenko A. A. Obzor y analiz oborudovaniya dlya opredeleniya tekhnicheskoho sostoyaniya elektrokhimycheskykh akkumulyatorov [Review and analysis equipment for determining the technical state of the electrochemical battery]. *Avyatsyonno-kosmycheskaya tekhnika i tekhnolohyya*. 2011. no. 4(81). pp. 44–49. 6. Bezruchko K. V., Synchenko S. V., Azarnov A. L., Laznenko V. Y., Tymchenko A. A. Sravnene metody postroyeniya matematycheskykh modeley dlya yssledovaniya elektrokhimycheskykh akkumulyatorov [Comparison of methods of constructing mathematical models for the study of electrochemical battery] *Avyatsyonno-kosmycheskaya tekhnika i tekhnolohyya*. 2015. no. 7/124. pp. 68–71.

Поступила (received) 26.09.2016

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Експресс-диагностика электрохимических аккумуляторов энергоустановок подвижных объектов / А. Л. Азарнов, К. В. Безручко, В. И. Лазненко, С. В. Синченко, А. А. Харченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 3 – 11. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Експресс-диагностика электрохимических аккумуляторов энергоустановок подвижных объектов / А. Л. Азарнов, К. В. Безручко, В. И. Лазненко, С. В. Синченко, А. А. Харченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 3 – 11. Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Rapid diagnosis of electrochemical batteries power plants moving objects / A. L. Azarnov, K. V. Bezruchko, V. I. Laznenko, S. V. Sinchenko, A. A. Kharchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1253). – P. 3 – 11. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.**

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

**Азарнов Олександр Леонідович** – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 788-44-28; email: azarnoff@mail.ru.

**Азарнов Александр Леонидович** – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 788-44-28; email: azarnoff@mail.ru.

**Azarnov Alexander Leonidovich** – National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Senior Research Fellow, Kharkiv, tel.: (057) 788-44-28; email: azarnoff@mail.ru.

**Костянтин Васильович Безручко** – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», головний науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 788-40-65; email: kvbezruchko@mail.ru.

**Константин Васильевич Безручко** – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», главный научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 788-40-65; email: kvbezruchko@mail.ru.

**Konstantin Bezruchko** - Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Chief Researcher, Kharkiv; tel.: (057) 788-40-65; email: kvbezruchko@mail.ru.

**Лазненко Віктор Іванович** – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 788-44-28; email: laznenko.vitya@mail.ru.

**Лазненко Віктор Іванович** – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 788-44-28; email: laznenko.vitya@mail.ru.

**Laznenko Viktor Ivanovich** – National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Senior Research Fellow, Kharkiv, tel.: (057) 788-44-28; email: laznenko.vitya@mail.ru.

**Синченко Світлана Володимирівна** – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 788-44-28; email: s.sinchenko@gmail.com.

**Синченко Светлана Владимировна** – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 788-44-28; email: s.sinchenko@gmail.com.

**Sinchenko Svitlana Vladimirovna** – National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Senior Research Fellow, Kharkiv, tel.: (057) 788-44-28; email: s.sinchenko@gmail.com.

**Харченко Андрій Анатолійович** – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», старший науковий співробітник, м. Харків; тел.: (057) 788-44-28; email: a\_kharchenko2004@ukr.net.

**Харченко Андрей Анатоліевич** – Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», старший научный сотрудник, г. Харьков; тел.: (057) 788-44-28; email: a\_kharchenko2004@ukr.net.

**Kharchenko Andrey Anatolievich** – National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», Senior Research Fellow, Kharkiv, tel.: (057) 788-44-28; email: a\_kharchenko2004@ukr.net.

УДК 621.315.2

**О.В. ГОЛИК, С. Ю. АНТОНЕЦЬ, Л.А. ЩЕБЕНЮК В. В. ЗОЛОТАРЬОВ****ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТІВ В ЕМАЛЬПРОВОДІ З ПОЛІІМІДНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ**

Представлено результати неруйнівного технологічного контролю кількості дефектів в ізоляції емаль проводу на основі поліімідного полімеру. Розглянуто застосування статистичного методу аналізу результатів вимірювання показників цього контролю за допомогою математичної моделі тренду для використання результатів в активному технологічному контролі. Запропоновано рекомендації щодо практичного використання параметрів функції тренду в технологічному контролі. Параметром тренду є швидкість зменшення (чи збільшення) довжини проводу з заданою дефектністю впродовж технологічного циклу. Теоретично показана і вимірюваннями підтверджена можливість кількісної оцінки тенденції зміни впродовж технологічного циклу дефектності емаль ізоляції для проводу ПЭЭИДХ2 – 200 з двохшаровою поліімідною ізоляцією номінальним діаметром 0,56 мм. Визначення кількісної оцінки тенденції зміни дефектності емаль ізоляції дозволяє виділити і кількісно оцінити випадкову похибку технологічного процесу – сумарну похибку результатів технологічного контролю, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу і зумовлена багатьма чинниками, впливом кожного з яких можна знехтувати порівняно із сумою. Бібл. 5, рис. 6.

**Ключові слова:** емаль провод, поліімідна ізоляція, дефектність ізоляції, технологічний контроль, випробування напругою.

Представлены результаты неразрушающего технологического контроля количества дефектов в изоляции эмаль провода на основе полиимидного полимера. Рассмотрено применение статистического метода анализа результатов измерения показателей такого контроля с помощью математической модели тренда для использования результатов в активном технологическом контроле. Предложены рекомендации для практического использования параметров функции тренда в технологическом контроле. Параметром тренда является скорость уменьшения (или увеличения) длины провода с заданной дефектностью в течение технологического цикла. Теоретически показана и измерениями подтверждена возможность количественной оценки тенденции изменения в течение технологического цикла дефектности эмальизоляции для провода ПЭЭИДХ2 – 200 с двухслойной полиимидной изоляцией номинальным диаметром 0,56 мм. Определение количественной оценки тенденции изменения дефектности эмаль изоляции позволяет выделить и количественно оценить случайную ошибку технологического процесса – суммарную ошибку результатов технологического контроля, которая является количественной характеристикой случайной составляющей стабильности технологического процесса и обусловлена большим количеством причин, влиянием каждого из которых можно пренебречь по сравнению с суммой. Библ. 5, рис. 6.

**Ключевые слова:** эмаль провод, полиимидная изоляция, дефектность изоляции, технологический контроль, испытания напряжением.

In this paper can be used to not destroying technological monitoring of defects isolation enameled wire with polyimide polymer. The thesis is devoted to the statistical method for processing, comparison and analysis of outcomes of measurements of parameters isolation it enameled wire because of mathematical model of trend for application in active technological monitoring is developed; to development used of the recommendations for parameters of such monitoring. Is theoretically justified and the possibility of a diminution of dependence of an error from a velocity of movement of a wire for want of quantifying of defects enameled isolation not destroying tests by high voltage. The dependence of average value of amount of defects for enameled wire ПЭЭИДХ2 – 200 with two-sheeted polyimide by isolation in a range of nominal diameter 0,56 mm is experimentally determined. The technological monitoring purpose is the reduce of quantifying defects of enameled isolation.

**Key words:** enameled wire, polyimide by isolation, defects of isolation, technological monitoring, tests by high voltage.

**Постановка проблеми.** Умови суворої конкуренції ринкових механізмів при впровадженні масової інноваційної продукції в кабельному виробництві реально диктують використання в якості основного критерію ліквідності ціновий фактор. Такий критерій може входити у протиріччя з технічним рівнем продукції. Це протиріччя стосується не тільки ринку емальпроводів. Але воно особливо актуальне для відносно дорогої інноваційної продукції, якою є емальпровід на основі поліімідних синтетичних співполімерів з температурним індексом 200 °С.

Такі емальпроводи мають найвищі на сьогодні електричні і механічні властивостями ізоляції [1, 2]. Для їх виробництва застосовують складне і дороге технологічне обладнання з високими швидкостями емальювання (до 1000 м/хв.) і глибоким каталітичним спаленням розчинників емальлаквів [2]. Впровадження таких інноваційних видів кабельної продукції у виробництво дозволяє забезпечити найвищий сучасний рівень електричної, механічної міцності і нагрівостійкості виткової ізоляції обмоток електричних машин і апаратів. Відповідно забезпечити конкурентоспроможність електромашинобудуван-

ня.

Протиріччя між відносно високою вартістю інноваційної продукції, виготовлення якої базується на використанні сучасних передових технологій і матеріалів, з одного боку, і використання в якості основного критерію ліквідності цінового фактору, з іншого, вимагає від виробника такої продукції впровадження нестандартних технічних і організаційних рішень щодо технологічного забезпечення найвищого сучасного рівня продукції із одночасним зменшенням затрат на її виробництво.

Задача, на перший погляд, здається такою, що не має вирішення для виробників в період освоєння відомої в світі, але інноваційної саме для них продукції. Це наглядно демонструє сучасна концепція “Шість сігм” (“6σ”) [1]. В ній критерієм якості продукції є її однорідність, яка визначається статистичною процедурою нормального розподілу [2]. По суті концепція “Шість сігм” є демонстрацією досягнень і маркетинговим захистом відомого виробника масової продукції. Освоєння інноваційної продукції конкретним виробником вимагає застосування системи оперативного технологічного контролю, який забезпечує ліквідність продукції за досягнутого рів-

ня технічних параметрів. Проблема для конкретного виробника полягає в розробленні і впровадженні нестандартних технічних і організаційних рішень технологічного контролю з обов'язковою прив'язкою технічних параметрів до досягнутого рівня технології виробництва. В даному разі мова йде про емальпровід на основі поліімідних синтетичних співполімерів з подвійною ізоляцією і з температурним індексом 200 °С, виготовлений на вітчизняному кабельному заводі.

Особливістю поліефірімідних і поліамідмідних емальлаків є те, що повне завершення процесу полімеризації відбувається тільки в тонких шарах (не більше 2 ... 3 мкм). Тому на сучасних емальагрегатах застосовують маршрути з кількістю проходів проводу через лак до 24. Дисперсії параметрів проводу визначають після його виготовлення. Такий контроль є пасивним.

**Аналіз літератури.** Проблему протиріччя між відносно високою вартістю продукції і використанням в якості основного критерію ліквідності цінового фактору для проводів з поліімідною ізоляцією в [1] запропоновано вирішити шляхом встановлення нижчого рівня вимог до напруги пробою і коригування допуску на товщину ізоляції. Наприклад, для низьковольтних виробів менший рівень напруги пробою ізоляції є достатнім. Тобто запропоновано впровадження спектру потреб різних клієнтів, згідно з яким клієнт одержує провід, який максимально відповідає вимогам саме цього клієнта.

В реальній практиці такий підхід існував навіть за ситуації, коли «невідповідність стандарту переслідується за законом». Тепер, коли стандарти мають силу рекомендацій, впровадження спектру технічних вимог відповідно до потреб різних клієнтів значно розширює діапазон застосованих технічних вимог, а це, щонайменше, розмиває діапазони допустимих значень параметрів одного і того ж виробу і ускладнює відносини між виробником і користувачем продукції.

Світові виробники обладнання для емальпроводів на основі поліімідних синтетичних співполімерів [3] для поточного технологічного контролю використовують сучасні вискоєфективні системи неперервного статистичного контролю питомої кількості дефектів ( $er$ ) ізоляції в режимі *онлайн*. Кількість дефектів – це кількість місць, в яких струм через ізоляцію перевищує встановлений. Дискретне вимірювання струму через ізоляцію при дії високої напруги постійного струму (рис.1) забезпечує система EFHP фірми MAG-ECOTESTER [3]. Статистичні показники кількості дефектів ізоляції, зафіксовані для кожної котушки зберігаються на магнітних носіях для подальшого аналізу. Це – приклад сучасного технологічного контролю, в якому критерії прийняття технологічних рішень встановлює виробник.

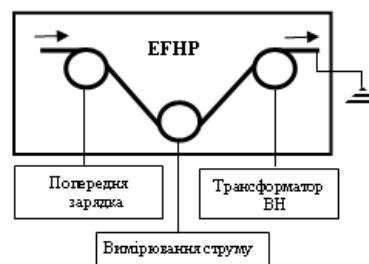


Рис. 1 – Принципова схема моніторинга числа дефектів в емальізоляції при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід

Необхідність оцінки кількості дефектів ізоляції емальпроводу є загальновизнаною. Саме поняття дефекту ізоляції емальпроводу досить умовне. Від відсутності ізоляції в місці дефекту: в місці співпадання дефектів на сусідніх витках обмотки пробивна напруга дорівнює нулю [4]. До підвищеного струму через емальізоляцію, яке свідчить про наявність в місці дефекту ізоляції [3]. Значення струму, яке в [3] детекторна схема реєструє як дефект, регулюється і, наприклад, для радіальної товщини ізоляції  $\approx 30$  мкм становить 10 мкА при випробувальній напрузі 1500 В.

Тому одним з основних нормованих контрольних параметрів залишається напруга пробою [1, 3, 4, 5], а дисперсія напруги пробою є параметром, який опосередковано кореспондується з питомою кількістю локальних дефектів ізоляції. Обидві характеристики, і дисперсія напруги пробою, і питома кількість дефектів, відображують однорідність ізоляції.

Контроль дисперсії основних технічних параметрів продукції слугує інформаційною базою для реалізації принципу неперервного підвищення якості згідно ISO 9001:2000. Однак такий контроль не передбачений нормативною технічною документацією. Використання системи EFHP [3] для контролю статистичних показників кількості дефектів ізоляції емальпроводу на основі поліімідних співполімерів є реальним технологічним заходом, який дає необхідну інформацію для реалізації принципу неперервного підвищення якості згідно ISO 9001.

Для визначення статистичних показників дефектності в системі EFHP застосовано уніфіковані статистичні програмні модулі. Для кожної котушки фіксується кількість контрольних ділянок проводу (по 100 м) чотирьох груп дефектності:

1 група – від 0 до 3 дефектів; 2 група – від 4 до 9 дефектів; 3 група – від 10 до 18 дефектів; 4 група – більше 18 дефектів (позначення дефекту  $er$ ).

Крім того фіксуються три основних статистичних показники: середня кількість дефектів на контрольній ділянці,  $M[er]$ ; кількість дефектів на контрольній ділянці з найбільшою кількістю дефектів,  $er_m$ ; середньоквадратичне відхилення кількості дефектів на контрольній ділянці,  $\sigma[er]$ .

Очевидно, що зафіксовані результати випробування за допомогою системи EFHP залежать від дисперсії багатьох параметрів дроту: механічних характеристик і діаметру провідника  $d_p$ , технологічних параметрів емальювання і товщини ізоляції  $\Delta$ ,

значення випробувальної напруги  $U$  і мінімального значення струму через ізоляцію  $I$ , за якого система фіксує наявність дефекту.

Тому аналіз результатів поточного технологічного контролю дефектності ізоляції емальпроводу – складна багатовимірна задача. Прийняття технологічних рішень за результатами такого контролю залежить від досвіду відповідального технолога і не є внормованим. У підсумку арбітром при прийнятному контролі залишається напруга пробою і дисперсія напруги пробою [5].

Найважчим є не ефективне використання технологічного контролю статистичних показників кількості дефектів емальізоляції, реалізованого у сучасному обладнанні для виготовлення проводів на основі поліімідних співполімерів. На наш погляд ця не ефективність зумовлена фундаментальною відмінністю між безпосередніми задачами приймального і технологічного контролю.

Задача приймального контролю у масовому виробництві – встановлення відповідності рівня основних параметрів готової продукції нормативним технічним вимогам. Задача технологічного контролю – вчасне попередження виходу основних параметрів виробу за межі встановленого технологічного допуску на конкретній технологічній лінії.

Сама задача попередження включає необхідність синхронізації контролю технічних, технологічних параметрів і технологічного часу в тому чи іншому вигляді. Наприклад, для кабелів і проводів при випробуваннях "на прохід" технологічний час визначається довжиною виробу, що пройшла через вимірювач, помноженою на швидкість руху.

Оцінювання тенденції змінювання технічних і технологічних параметрів впродовж технологічного часу є основною задачею технологічного контролю.

**Ціль роботи.** Виконати аналіз результатів неруйнівних випробувань високою напругою на прохід емальпроводу на основі поліімідних синтетичних співполімерів з подвійною ізоляцією і з температурним індексом 200 °С, виготовлений на вітчизняному кабельному заводі, який дозволяє розділити:

– тренд технологічного процесу – суттєву детерміновану зміну результатів технологічного контролю впродовж технологічного процесу з метою встановлення технологічних чинників, які спричиняють таку зміну для прийняття рішень корекції технологічних параметрів; тренд є детермінованою кількісною характеристикою стабільності технологічного процесу;

– випадкову похибку технологічного процесу – сумарну похибку результатів технологічного контролю, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу і зумовлена багатьма чинниками, впливом кожного з яких можна знехтувати порівняно із сумою.

Метою такого розділення є розроблення детермінованого і статистичного критеріїв стабільності швидкісного автоматизованого технологічного процесу виготовлення емальпроводу на основі поліімідних синтетичних співполімерів з подвійною ізоля-

цією і з температурним індексом 200 °С при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід.

### Основні одержані результати.

Експериментально визначено кількість  $er$  дефектів на кожній одиничній довжині 100 м для п'ятидесяти котушок емальпроводу (всього 180000 м проводу) в хронологічній послідовності виготовлення в неперервному автоматичному технологічному процесі.

Поточний контроль діаметра  $d_p$  мідного провідника в процесі емалювання (рис. 2) свідчить про наявність в технологічному процесі як тенденції поступової зміни параметрів (впродовж маршруту емалювання відбувається технологічна витяжка провідника – тренд технологічного процесу), так і випадкової складової діаметра  $d_p$  (після проходження калібрів № 4 і № 10 збільшення діаметра  $d_p$  є похибкою вимірювань), яка є частиною випадкової складової стабільності даного технологічного процесу.



Рис. 2 – Діаметр мідного провідника  $d_p$  після проходження відповідного калібру в маршруті емалювання: впродовж маршруту відбувається технологічна витяжка провідника, яка складає більше одного відсотка

Для аналізу ряду спостережень за кількістю  $er$  дефектів на кожній одиничній довжині 100 м емальпроводу застосовано статистичну модель тренда з помилкою (тільки помилка є випадковою величиною) для ряду спостережень за значеннями величини  $x$  [6]:

$$x_i = f(t_i) + \delta_i, \quad (1)$$

де  $t_i$  – детермінована змінна, яка є технологічним часом, який в даному разі пропорційний номеру виготовленої котушки проводу;

$f(t_i)$  – детермінована функція (тренд технологічного процесу);

$\delta_i$  – випадкова величина (випадкова складова стабільності технологічного процесу).

Значення  $\delta_i$  є незалежними, однаково і нормально розподіленими. Функція  $f(t)$  задана формулою або алгоритмом обчислень і залежить від ряду невідомих параметрів  $c_1, \dots, c_k$ , значення яких визначають методом максимальної правдоподібності.

В разі лінійної функції для кожного  $t$  значення  $x$  нормально розподілене з середнім  $x(t) = a + b(t$

–  $t_m$ ) і середньоквадратичним  $\sigma$ . Оцінки невідомих параметрів  $a$ ,  $b$  і  $\sigma$ :

$$a^* = x_m; \quad (2)$$

$$b^* = \Sigma(t_i - t_m)(x_i - x_m) / [\Sigma(t_i - t_m)^2]; \quad (3)$$

$$\sigma^* = \{n^{-1} \Sigma[x_i - a^* - b^*(t_i - t_m)]^2\}^{0.5}, \quad (4)$$

де  $t_m$  – середнє значення детермінованої змінної  $t$ ;

$x_m$  – середнє ряду спостережень за значеннями величини  $x$ .

Достовірні  $p$ -процентні границі для  $x(t)$  при заданому  $t$  визначає параметр  $\gamma_p$  розподілу Стьюдента за  $n - 2$  ступенями свободи:

$$a^* + b^*(t - t_m) \pm \gamma_p \sigma^* (n - 2)^{-0.5} [1 + (t - t_m)^2 n / \Sigma(t_i - t_m)^2]^{0.5}. \quad (5)$$

Для емальпроводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів на рис.3 наведено результати визначення кількості одиничних довжин (100 м), які містять від 18 дефектів і більше. Умовно такі одиничні довжини можна вважати найбільш дефектними (далі: «гірші стометрівки»).

$x_i$  – кількість «гірших стометрівок» на котушці за номером  $i$  в неперервному технологічному циклі виготовлення.

$x(er > 18)$

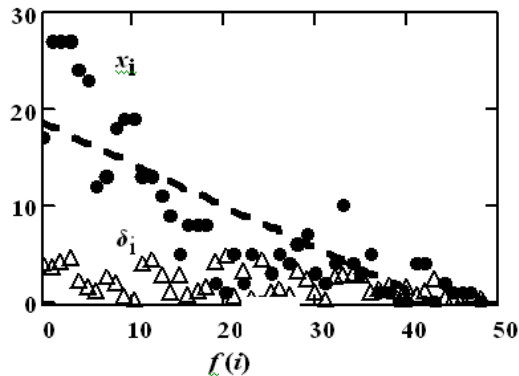


Рис. 3 – Результати визначення кількості одиничних довжин (по 100 м), які містять від 18 дефектів і більше для емальпроводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів:  $x_i$  – кількість «гірших стометрівок» (18 дефектів і більше) на котушці за номером  $i$  в неперервному технологічному циклі виготовлення;  $f(i)$  – детермінована функція (тренд процесу), визначена за (2), (3);  $\delta_i$  – випадкова складова процесу, визначена як  $\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}$

Тенденцію зменшення кількості «гірших стометрівок» впродовж технологічного періоду спостережень кількісно характеризує детермінована функція  $f(i)$ .

Випадкову складову стабільності технологічного процесу представлено як масив  $\delta_i$  абсолютних значень відхилення кількості «гірших стометрівок»  $x_i$  від детермінованої функції  $f(i)$ :

$$\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}. \quad (6)$$

В наведеному прикладі масив  $\delta_i$  не має вираженого тренду і середнє значення  $\delta_m$  є кількісною

оцінкою технологічної похибки впродовж технологічного періоду спостережень, зокрема – похибки використаного методу контролю.

Дані на рис.3 свідчать про принципову можливість розділення і кількісної оцінки:

по-перше, тренду технологічного процесу, причини якого і відповідні технологічні заходи мають бути встановлені технологічною службою;

по-друге, випадкової складової стабільності технологічного процесу, середнє значення якої є кількісною оцінкою технологічної похибки, яка є предметом статистичного контролю технологічного процесу.

Очевидно, що має бути передбачена можливість наявності тренду випадкової складової стабільності технологічного процесу.

В такому разі має бути застосовано статистичну модель тренда з помилкою до випадкової складової  $\delta_i$ : формули (1) ... (6), в які  $\delta_i$  підставлено замість масиви значень  $x_i$ .

Послідовність статистичних масивів і відповідних статистичних параметрів, визначених рекурентними процедурами за формулами (2) – (6) наведена в наступній таблиці.

Таблиця 1 – Послідовність статистичних масивів і відповідних статистичних параметрів, визначених рекурентними процедурами

№ п/п	Масиви	Параметри тренду	Статистичні параметри випадкової складової	
			Середнє	Середньоквадратичне відхилення
1	$x_i, \delta_i$	$a^*, b^*, \sigma^*$	$\delta_m$	$s\delta$
2	$\delta_{2i}, \delta_{2i}$	$a2^*, b2^*, \sigma2^*$	$\delta_{2m}$	$s\delta2$
3	$\delta_{3i}, \delta_{3i}$	$a3^*, b3^*, \sigma3^*$	$\delta_{3m}$	$s\delta3$
...	...	...	...	...

Параметри тренду, визначені статистично з заданою точністю (формула (5)), є параметрами детермінованих функцій. Серед них технологічно мають бути проаналізовані значення, в першу чергу, параметрів, які характеризують кількісно швидкість зміни контрольної величини впродовж технологічного періоду спостережень.

В прикладі на рис. 3 це параметр  $b^*$  функції  $f(i)$  – швидкість зменшення кількості «гірших стометрівок»:  $b^* = -86,88 \pm 9,25$  (м/год), що орієнтовно становить зменшення на одну «гіршу стометрівку» за час виготовлення двох котушок (зменшення на 1,4 % довжини відносно дефектного емальпроводу на одну котушку).

Автоматизація контролю і статистичної обробки даних, виділення детермінованого тренду і представлення його результатів у вигляді простого кількісного смислу статистичних параметрів забезпечує можливість поточного виявлення і аналізу причини того чи іншого тренду з метою доцільного коригування технологічного процесу.

Одночасне виділення випадкової складової процесу  $\delta_i$  ( $\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}$ ) дозволяє кількісно оцінити похибку процесу, причин появи якої може

бути дуже багато і зниження якої за необхідності потребує комплексного підходу, який в світовій практиці прийнято називати методом Демінга [7].

Наведений приклад, – один лінійний тренд, одна випадкова складова процесу, – найпростіший. Детермінована функція  $f(i)$  може не бути лінійною (вона може бути і періодичною [6]).

Наприклад, масив  $x_i$  на рис.3 може бути краще описаний спадною експоненційною функцією, яка зміною системи координат може бути зображена прямою. Виконані відповідні розрахунки виявилися більш складними, але технологічні висновки залишилися незмінними.

Більш складною, але доцільною для подальшого технологічного аналізу є наявність тренду випадкової складової стабільності технологічного процесу.

В такому разі слід застосувати статистичну модель тренда з помилкою до випадкової складової  $\delta_i$ .

На рис. 4 наведені результати статистичного аналізу стабільності технологічного процесу виготовлення того ж емальпроводу по кількості бездефектних одиничних довжин на котушці у вигляді кількості  $x_i$  одиничних довжин (по 100 м), які містять менше трьох дефектів:  $x_i$  – кількість «кращих стометрівок» на котушці за номером  $i$  в неперервному технологічному циклі виготовлення.

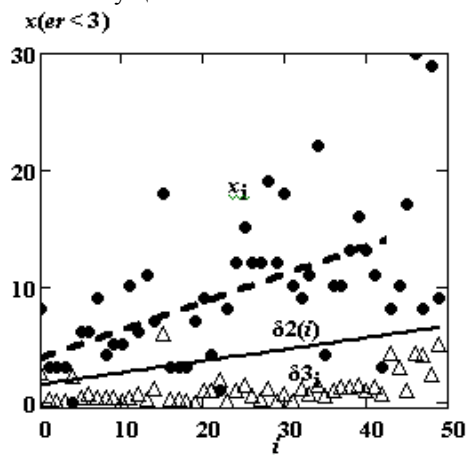


Рис. 4 – Результати визначення кількості одиничних довжин (по 100 м), які містять від 18 дефектів і більше для емальпроводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів:  $x_i$  – кількість «гірших стометрівок» (18 дефектів і більше) на котушці за номером  $i$  в неперервному технологічному циклі виготовлення;  $f(i)$  – детермінована функція (тренд процесу), визначена за (2), (3);  $\delta_i$  – випадкова складова процесу, визначена як  $\delta_i = ([x_i - f(i)]^2)^{0.5}$

Теоретично кількість таких рекурентних процедур  $n$  може бути необмеженою (поки спостерігається наявність тренду випадкової складової), але вона не повинна бути великою, оскільки дисперсія кожної наступної випадкової складової  $D[\delta n]$  швидко наближається до нуля (рис.5).

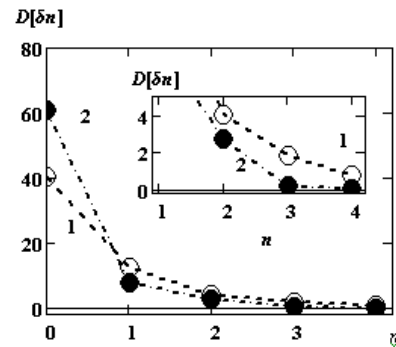


Рис. 5 – Залежність дисперсії випадкової складової  $D[\delta n]$  від номеру  $n$  рекурентної статистичної процедури:

1 –  $D[\delta n(er < 3)]$ ; 2 –  $D[\delta n(er > 18)]$

Для розглянутого процесу нами використано  $n = 3$ , оскільки при цьому коефіцієнт варіації випадкової складової  $\delta_3$  є найбільшим і наближається до одиниці, що свідчить про приблизну рівність середнього  $\delta_{3m}$  і середньоквадратичного відхилення  $s\delta_3$  випадкової складової процесу (рис.6). Важливо те, що залежності  $V[\delta n] = f(n)$  (рис.6) мають подібний характер для масивів (див. рис. 3,4), які відрізняються і за формою візуальної прогонки (рис.3: експоненційне спадання; рис.4: лінійне зростання), і за напрямом тренду (рис.3: спадання; рис.4: зростання).

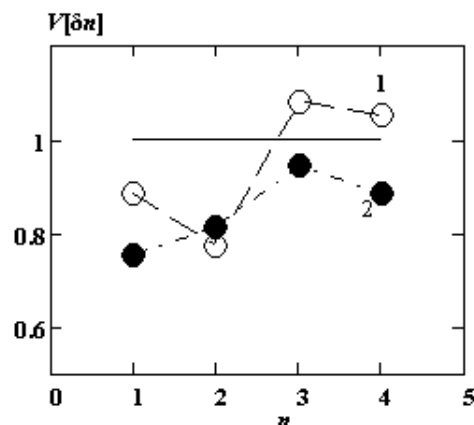


Рис. 6 – Залежність коефіцієнту варіації випадкової складової  $V[\delta n]$  від номеру  $n$  рекурентної статистичної процедури  $V[\delta n] = f(n)$ : 1 –  $V[\delta n(er < 3)]$ ; 2 –  $V[\delta n(er > 18)]$

Доцільно використати саме коефіцієнт варіації випадкової складової  $V[\delta]$  масиву даних як критерій кількості рекурентних процедур  $n$ , яка дозволяє виділити випадкову складову технологічного процесу  $\delta n_i$  ( $\delta n_i = ([\delta(n-1)_i - \delta(n-1)(i)]^2)^{0.5}$ ) і тим самим оцінити похибку процесу. На рис.4 – це масив  $\delta_3$  з середнім  $\delta_{3m} = 1,24$ , яке складає менше 13 % від середнього вихідного масиву ( $x_m = 9,2$ ). Тобто реальна випадкова похибка даного технологічного контролю становить  $\pm 1$  «краща стометрівка».

Параметри трендів, які є параметрами детермінованих функцій технологічно мають бути проаналізовані, оскільки вони не є випадковими.

Значна різниця між швидкістю збільшення кількості «бездефектних стометрівок» ( $\approx 48$  м/год), з одного боку, і швидкістю зменшення кількості «гі-



рших стометрівок» ( $\approx -86$  м/год), з іншого, одно-значно свідчить про те, що технологічний цикл ізолювання на швидкісних автоматичних емальгрегатах в принципі не є стабільним. В ньому слід розрізняти, використовуючи термінологію технічної надійності, періоди припрацювання (підвищеної дефектності ізоляції), нормального ізолювання (дефектність ізоляції характеризує рівень технології) і період "втоми" (дефектність ізоляції зростає швидше, ніж в період нормального ізолювання).

Тривалість цих періодів, а отже і технологічна логістика емалювання в умовах конкретного виробництва має бути визначена шляхом розділення і кількісної оцінки параметрів дефектності ізоляції, а саме:

трендів дефектності ізоляції, причини яких і відповідні технологічні заходи мають бути встановлені технологічною службою;

випадкової складової стабільності технологічного процесу, середнє значення якої є кількісною оцінкою статистичної похибки технологічного контролю.

В прикладі на рис. 4 параметр  $b^*$  функції  $f(i)$  – швидкість збільшення кількості «бездефектних стометрівок»:  $b^* = 47,8$  м/год, що орієнтовно становить збільшення на одну «бездефектну стометрівку» за час виготовлення чотирьох котушок.

Крім того спостерігається систематичне збільшення розсіяння результатів визначення кількості «бездефектних стометрівок»  $\delta_i$ , кількісно оцінене параметром функції  $\delta 2(i)$ :  $b 2^* = 20,2$  м/год. Параметр  $b 2^*$  є кількісною характеристикою неоднорідності емальізоляції і тому має такий же знак, як параметр  $b^*$  функції  $f(i)$ . Неоднорідність емальізоляції в даному разі – результат її ексцентриситету, нерівностей на поверхні мідного провідника і можливих неоднорідностей в структурі діелектрика.

#### Висновки.

1. Результати контролю дефектності емальізоляції на основі поліімідних синтетичних співполімерів в процесі неруйнівних технологічних випробувань високою напругою на прохід свідчать про можливість і доцільність виділення **тренду** технологічного процесу – детермінованої кількісної характеристики стабільності технологічного процесу. Доцільність виділення **тренду** полягає у встановленні технологічних чинників, які спричиняють детерміновану зміну контрольного параметру для прийняття рішень корекції технологічного процесу.

2. Виділення **тренду** технологічного процесу дає можливість кількісно оцінити **випадкову похибку** технологічного процесу, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу і зумовлена багатьма чинниками, впливом кожного з яких можна знехтувати порівняно із сумою.

3. Поточний контроль діаметра  $d_p$  мідного провідника в процесі емалювання свідчить про наявність в цьому технологічному процесі як тенденції поступової зміни параметрів (впродовж маршруту емалювання відбувається технологічна витяжка

провідника – тренд технологічного процесу), так і випадкової складової діаметра  $d_p$ , яка є випадковою складовою стабільності даного технологічного процесу.

4. Виділено **тренд** технологічного процесу ізолювання проводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів на швидкісних автоматичних емальгрегатах у вигляді швидкості (параметр тренду  $b^*$ ) зменшення дефектності впродовж технологічного циклу:  $b^* = -86,88 \pm 9,25$  (м/год), що орієнтовно становить зменшення на 1,4 % довжини відносно дефектного емальпроводу на одну котушку.

5. Співставлення швидкості зменшення дефектності в різні періоди технологічного циклу свідчить про те, що технологічний цикл ізолювання на швидкісних автоматичних емальгрегатах в принципі не є стабільним. В ньому слід розрізняти, використовуючи термінологію технічної надійності, періоди припрацювання (підвищеної дефектності ізоляції), нормального ізолювання (дефектність ізоляції стабільна і характеризує рівень технології) і період "втоми" (дефектність ізоляції зростає швидше, ніж в період нормального ізолювання). Тривалість цих періодів, а отже і технологічна логістика емалювання в умовах конкретного виробництва має бути визначена шляхом обмеження тривалості неперервного технологічного циклу періодом нормального ізолювання (дефектність ізоляції стабільна і характеризує рівень технології). Критерієм такого обмеження має бути зміна знака швидкості (параметр тренду  $b^*$ ) зменшення дефектності впродовж елементів неперервного технологічного циклу, тривалість яких визначена за принципом Мізеса [6].

#### Список літератури

1. Зеленецький Ю.А. О совершенствовании технической документации на эмалированные провода. / Ю.А. Зеленецкий // Кабели и провода. – 2013. – № 5. – С. 19 – 23.
2. Шебенюк Л.А. Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емальпроводів. / Л.А. Шебенюк, С.Ю. Антоненко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 23 – С. 43 – 46.
3. Голік О.В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной эмальізоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход / О. В. Голік // Український метрологічний журнал, 2009. – № 1. – С.12–17.
4. Андрианов А. В. О статистике точечных поверждений обмоточных проводов и витковых замыканий обмоток / А. В. Андрианов, В.К. Андрианов, Е.В. Бьков. // Кабели и провода. – 2013. – № 5. – С. 28 – 31.
5. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. –classified: October 2007. – p.18.
6. Тутубалин В.Н. Статистическая обработка рядов наблюдений / В. Н. Тутубалин. – М.: Знание, 1973. – 64 с.
7. Mary Walton The Deming Management Method / Mary Walton. – New York, 1986. – 262 p.

#### References (transliterated)

1. Zelenetsky Yu. A. [About the improvement of technical documentation for enameled wires]. Cables and wires. 2013. No. 5. pp 19 – 23.
2. Shebenjuk L.A., Antonenc S.Ju. [Statistical method purpose is the reduce of quantifying defects of enameled wire]. [Bulletin of NTU KhPI] Kharkov, 2012, no. 23, pp. 43 – 46.
3. Golik O.V. [Quantifying of defects for enameled wire with two-sheeted polyimide isolation by tests by high voltage]. Ukraine metrological magazine. 2009. no. 1. pp.12–17.
4. Andrianov A.V., Andrianov V.K., Bikov E.V. [About the statistics of pin-hole damages of winding wires and inter-turn short-circuits in windings]. [Cables and wires]. Moscow. 2013. no. 5. pp. 28 – 31.
5. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p.18
6. Tutubalin V.N. [Statistical data processing]. Moscow Znanie Publ. 1973. – p. 64.
7. Mary Walton. The Deming Management Method. – New York, NY Publ., 1986. 262 p.

Надійшла (received) 05.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Технологічний контроль дефектів в емальпроводі з поліімідною ізоляцією / О. В. Голик, С. Ю. Антоненя, Л. А. Щепенюк, В. М. Золотарьов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 12 – 18. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Технологический контроль дефектов в эмальпроводе с полиимидной изоляцией / О. В. Голик, С. Ю. Антоненя, Л. А. Щепенюк, В. М. Золотарев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 12 – 18. Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Technological monitoring of defects in enameled wire with polyimide isolation / O. V. Golik, S. Y. Antonets, L. A. Scheveniuk, V. V. Zolotarjov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1253). – P. 12 – 18. Bibliogr.: 7. – ISSN 2224-0349.**

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

**Голик Оксана Вячеславівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків тел.: 707-65-44; e-mail: [agurin@kpi.kharkov.ua](mailto:agurin@kpi.kharkov.ua).

**Голик Оксана Вячеславовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника» Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", г. Харьков;

тел.: 707-65-44; e-mail: [agurin@kpi.kharkov.ua](mailto:agurin@kpi.kharkov.ua).

**Golik Oksana Vyacheslavovna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: 707-65-44; e-mail: [agurin@kpi.kharkov.ua](mailto:agurin@kpi.kharkov.ua).

**Антоненя Станіслав Юрійович** – кандидат технічних наук, аспірант кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: [agurin@kpi.kharkov.ua](mailto:agurin@kpi.kharkov.ua).

**Антоненя Станіслав Юрьевич** – аспирант кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника» Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", г. Харьков;

тел.: 707-65-44; e-mail: [agurin@kpi.kharkov.ua](mailto:agurin@kpi.kharkov.ua).

**Antonets Stanislav Yuriyovich** – postgraduate of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: 707-65-44; e-mail: [agurin@kpi.kharkov.ua](mailto:agurin@kpi.kharkov.ua).

**Щепенюк Леся Артемівна** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: [agurin@kpi.kharkov.ua](mailto:agurin@kpi.kharkov.ua).

**Щепенюк Леся Артемовна** – кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника» Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", г. Харьков;

тел.: 707-65-44; e-mail: [agurin@kpi.kharkov.ua](mailto:agurin@kpi.kharkov.ua).

**Shchebeniuk Lesia Artemovna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: 707-65-44; e-mail: [agurin@kpi.kharkov.ua](mailto:agurin@kpi.kharkov.ua).

**Золотарьов Володимир Володимирович** – кандидат технічних наук, директор департаменту зовнішніх економічних зв'язків приватного акціонерного товариства «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: 754-52-18; e-mail: [antonets.uves@yuzhcable.com.ua](mailto:antonets.uves@yuzhcable.com.ua).

**Золотарев Владимир Владимирович** – кандидат технических наук, директор по внешним экономическим связям приватного акционерного общества «ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ», г. Харьков; тел.: 754-52-18; e-mail: [antonets.uves@yuzhcable.com.ua](mailto:antonets.uves@yuzhcable.com.ua).

**Zolotarjov Vladymyr Vladymyrovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Director department of Joint Stock Company "ZAVOD JUGCABLE", Kharkov; tel.: 754-52-18; e-mail: [antonets.uves@yuzhcable.com.ua](mailto:antonets.uves@yuzhcable.com.ua).

УДК 621.311

**О. Г. ГРИБ, А.А. ЗУЕВ, С.Ю. ШЕВЧЕНКО, С.В. ШВЕЦ, Т.С. ИЕРУСАЛИМОВА,  
А.В. БОРТНИКОВ****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Стаття присвячена опису алгоритму комплексного автоматизованого моніторингу ЛЕП енергетичної системи, спрямованого на забезпечення безпеки функціонування її обладнання та персоналу. Як показує аналіз причин відмов ЛЕП, вони в основному відбуваються на ЛЕП 110 кВ – 86 %, 11 % - на ЛЕП 220 кВ і 3 % ЛЕП 330-750 кВ. Такий розподіл числа відмов пропорційно довжині відповідних ЛЕП. Найбільша кількість аварійних відключень ЛЕП викликано пошкодженням проводів і грозозахисних тросів – 56 %. Іншими причинами, що викликають відключення ЛЕП, є такі пошкодження як пробій ізоляторів – 19 %, пошкодження опор - 15 % та інших елементів ЛЕП – 10 %.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, моніторинг, лінія електропередачі, електроенергія, тепловізор.

Статья посвящена описанию алгоритма комплексного автоматизированного мониторинга ЛЭП энергетической системы, направленного на обеспечение безопасности функционирования ее оборудования и персонала. Как показывает анализ причин отказов ЛЭП, они в основном происходят на ЛЭП 110 кВ – 86 %, 11 % - на ЛЭП 220 кВ и 3 % ЛЭП 330-750 кВ. Такое распределение числа отказов пропорционально длине соответствующих ЛЭП. Наибольшее число аварийных отключений ЛЭП вызвано повреждением проводов и грозозащитных тросов – 56 %. Другими причинами, вызывающими отключения ЛЭП, являются такие повреждения как пробой изоляторов – 19 %, повреждения опор - 15 % и других элементов ЛЭП – 10 %.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, мониторинг, линия электропередачи, электроэнергия, тепловизор.

The article is devoted to the description of the algorithm integrated automated monitoring of power lines power system, aimed at ensuring the safe operation of its equipment and personnel. As shows the analysis of the causes of failures of power lines, they mainly occur on the transmission line 110 kV – 86 %, 11 % - for transmission lines 220 kV and 3% transmission lines 330-750 kV. Such a distribution of the number of failures in proportion to the length of corresponding transmission lines. The greatest number of outages of transmission line caused by a damaged wire and ground wire is 56 %. Other reasons causing outage of the transmission line are such damage as a breakdown of insulators – 19 %, damage of supports to 15% and other elements of the LEP – 10 %. According to statistics, a sharp increase in outages of transmission lines occur in the spring and summer because of the ceiling insulation by green spaces. A fair number of outages of transmission lines due to vandalism, such as destruction of garlands insulators, theft of wires and elements of electric poles, lashed out at wire transmission lines etc.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, monitoring, power line, electricity, thermal imager.

**Вступлення.** Стаття присвячена описанию алгоритма комплексного автоматизированного мониторинга ЛЭП энергетической системы, направленного на обеспечение безопасности функционирования ее оборудования и персонала. Как показывает анализ причин отказов ЛЭП, они в основном происходят на ЛЭП 110 кВ – 86 %, 11 % - на ЛЭП 220 кВ и 3 % ЛЭП 330-750 кВ [1]. Такое распределение числа отказов пропорционально длине соответствующих ЛЭП. Наибольшее число аварийных отключений ЛЭП вызвано повреждением проводов и грозозащитных тросов – 56 %. Другими причинами, вызывающими отключения ЛЭП, являются такие повреждения как пробой изоляторов – 19 %, повреждения опор - 15 % и других элементов ЛЭП – 10 %. Согласно имеющейся статистике, резкое возрастание аварийных отключений ЛЭП происходит в весенне-летний период из-за перекрытий изоляционных промежутков зелеными насаждениями. Велико также число аварийных отключений ЛЭП из-за вандализма, такого как разрушение гирлянд изоляторов, похищение проводов и элементов опор ЛЭП, набросы на провода ЛЭП и др. [1]. При этом особое значение приобретает мониторинг состояния систем передачи электроэнергии от производителя к потребителю, который должен быть направлен на предотвращение аварийных отключений ЛЭП, а также скорейшего восстановления их работоспособности, если такое отключение произошло.

**Анализ последних исследований и литературы.**

Такой мониторинг получил развитие за рубежом [1-4].

При этом осуществляется контроль состояния ЛЭП путем ее оптической регистрации и регистрации с помощью тепловизоров, а также регистрации частичных разрядов, имеющих место в изоляции.

Мониторинг предполагает использование БПЛА для плановой и внеплановой регистрации состояния ЛЭП. Предполагается, что внеплановые облеты будут производиться при аварийных ситуациях на ЛЭП. С помощью БПЛА будут записываться с воздуха картины ЛЭП в оптическом и инфракрасном диапазонах, а также измеряться напряженности их электрического (ЭП) и магнитного (МП) полей вдоль трассы пролета. Использование специально разработанного программного обеспечения позволит сравнить регистрируемые БПЛА картины с предварительно созданными эталонными картинами, соответствующих штатным режимам работы контролируемых ЛЭП. Такие эталонные картины в совокупности с экспериментально полученными картами защитных заземлений будут сведены в единый документ – паспорт ЛЭП. Данный паспорт должен содержать также измеренные и рассчитанные значения уровней напряженностей электрического и магнитных полей в местах пребывания персонала энергетических объектов и расположения оборудования, наиболее уязвимо к воздействию

электромагнитных помех. При необходимости в рамках выполнения проводимого мониторинга будут даны рекомендации по конструкции и расположению

электромагнитных экранов, снижающих уровни электромагнитных воздействий, и молниеотводов, уменьшающих вероятность поражения молнией исследуемых объектов. В работе приводятся аналитические выражения, которые легли в основу разработанного программного обеспечения для расчета напряженности электрического поля в окрестности ЛЭП. Данное программное обеспечение будет использовано в качестве базового при навигации БПЛА вдоль ЛЭП, а также для распознавания нарушений в работе ЛЭП. Приведено также сравнение зависимостей напряженности ЭП, рассчитанных с помощью данного программного обеспечения, с данными, известными из литературы. Отличие предлагаемой методики мониторинга от существующих состоит в том, что комплексный контроль ряда параметров, характеризующих внешнее состояние объектов энергосистемы, а также ее основных электрических параметров будут полностью автоматизированы. Это станет возможным в результате использования специально разработанного программного обеспечения по распознаванию оптических и инфракрасных изображений, а также картин линий равной напряженности ЭП и МП.

**Цель статьи.** Мониторинг ЛЭП энергетической системы, направленный на обеспечение безопасности функционирования ее оборудования и персонала.

**Постановка проблемы.** Оперативное получение информации с помощью БПЛА о состоянии повреждений воздушных линий высокого и сверхвысокого напряжения (ЛЭП) которые вызываются разными причинами, среди которых не последнее место занимают как природные факторы - воздействие молний и птиц или ветровые нагрузки, обледенение и загрязнение изоляторов в регионах с неблагоприятными экологическими условиями, так и случайные или преднамеренные действия человека по повреждению подвесной изоляции.

**Материалы исследований.** Основным компонентом дистанционной системы мониторинга ЛЭП являются БПЛА. Под беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) понимается летательный аппарат, полет которого происходит под контролем или непосредственным управлением оператора, расположенного в наземном (или воздушном) пункте управления, с использованием двусторонних каналов связи, либо при помощи автопилота согласно полетному заданию. В последнее время БПЛА применяются при решении во все большего и большего количества задач в различных областях человеческой деятельности, начиная с исследования космоса и военного дела, заканчивая сельским хозяйством. Это обусловлено наличием ряда существенных преимуществ такого вида летательных аппаратов: отсутствие экипажа, небольшая стоимость и низкие

эксплуатационные затраты. Вместе со значительным прогрессом в развитии вычислительной техники и особенно ее миниатюризации и энергоэффективности, а также с развитием и практическим применением новых алгоритмов и методов применение БПЛА позволяет повысить эффективность решения сложных научно-практических задач, связанных с логистикой, мониторингом, контролем и безопасностью.

Мероприятия по мониторингу и обследованию сетей состоят из следующих этапов:

1) Создание трехмерных моделей маршрутов ЛЭП и элементов инфраструктуры, с топографической привязкой.

2) Тепловизионное и визуальное обследование линий, для выявления повышенного нагрева контактных соединений.

3) Анализ габаритных расстояний до подстилающей поверхности, объектов и растительности.

4) Выявление пролетов и элементов конструкции, ограничивающих пропускную способность или имеющих нарушенные габаритные расстояния.

5) Обследование опор и мест их закрепления в грунте (фундаментов, металлических конструкций, заземляющих устройств).

6) Инструментальный контроль остаточного сечения проводов и грозотросов, путем выборочного сканирования при помощи технологий неразрушающего контроля (магнитных дефектоскопов).

7) Оперативный контроль участков ЛЭП в случае возникновения чрезвычайных ситуаций.

8) Определение фактов несанкционированного доступа.

По результатам мониторинга и анализа сетей определяются следующие параметры:

1) Пропускная способность линии: допустимые ток и температура провода.

2) Проблемные участки линий, опоры и фундаменты.

3) Величины натяжений проводов и грозозащитных тросов.

После обследования проводятся мероприятия по повышению пропускной способности линии. Мировой опыт показывает, что такие проекты имеют высокую инвестиционную и практическую ценность, будучи реализованными, они существенно повышают надежность и безопасность эксплуатации ЛЭП.

Таким образом, одними из основных задач мониторинга ЛЭП являются: определение величины провисания проводов, определение мест повышенного нагрева и зарастания трасс ЛЭП растительностью. Научно-технические достижения последних лет позволяют использовать для решения этих задач, как классические методы, так и принципиально новые подходы, например, топографический мониторинг с помощью БПЛА, основанный на лазерном, визуальном и тепловизионном сканировании (локации) ЛЭП, с последующей фотограмметрической обработкой полученных данных. Что позволяет дать определить, каково положение, размеры, форма и

состояние объекта мониторинга, а также характер изменения этих параметров во времени.

Применение современных методов и алгоритмов локации позволяет оперативно получать точные карты трассы ЛЭП, а также положения всех ее частей, определять топологию рельефа и расположение других объектов, находящихся в непосредственной близости от трассы. Современные методы делают возможным получение трехмерной (3D) модели трассы, а также проведение любых геометрических измерений с использованием этой модели.

Использование специально разработанного программного обеспечения позволит сравнить регистрируемые БПЛА мультиспектральные изображения с предварительно созданными эталонами, соответствующими штатным режимам работы контролируемых ЛЭП. Такие эталонные изображения в совокупности с экспериментально полученными картами защитных заземлений могут быть сведены в единый документ – паспорт ЛЭП. Он должен содержать также измеренные и рассчитанные значения уровней напряженностей ЭП и МП в местах пребывания персонала энергетических объектов и расположения оборудования, наиболее уязвимо к воздействию электромагнитных помех. При необходимости в рамках выполнения проводимого мониторинга могут быть даны рекомендации по конструкции и расположению электромагнитных экранов, снижающих уровни электромагнитных воздействий, и молниеотводов, уменьшающих вероятность поражения молнией исследуемых объектов. В книге приводятся аналитические выражения, которые легли в основу разработанного программного обеспечения (ПО) для расчета напряженности ЭП в окрестности ЛЭП. Это ПО также может быть использовано при навигации БПЛА вдоль ЛЭП и для распознавания нарушений ее функционирования. Сравнение зависимостей напряженности ЭП, рассчитанной с помощью данного ПО, с общедоступными данными показывает совпадение по ключевым параметрам с высокой точностью. Основное преимущество метода дистанционного мониторинга состоит в том, что комплексный контроль ряда параметров, характеризующих внешнее состояние объектов энергосистемы, а также ее основных электрических параметров - полностью автоматизирован. Для автоматизации используется специализированное ПО, основанное на современных методах и алгоритмах фильтрации, сегментации и распознавания изображений. Для чего используются мультиспектральные изображения в видимом и инфракрасном спектрах, данные полученные методами лазерной локации, а также картины линий напряженности электрического и магнитного поля.

Основным функциональным элементом системы, который обеспечивает ее работоспособность, является множество БПЛА объединенных в единую сетевую систему.

**Результаты исследований.** Управление функционированием системы непосредственно осуществляется операторами. Система содержит трех-

мерную модель энергосистемы, которая непрерывно уточняется и детализируется, а также ГИС, которая наглядно позволяет представлять всю модель системы и осуществлять различные виды контроля. Такая модель также позволяет проводить эффективное обучение операторов БПЛА в различных ситуациях, и отрабатывать новые методы и алгоритмы управления и мониторинга.

Информация, поступающая с БПЛА через систему связи и из других технических систем мониторинга (автоматических подстанций и датчиков), накапливается и хранится на внутренних серверах системы в базу данных, что позволяет проводить анализ и статистическую обработку состояния ЛЭП за любой период времени.

Геоинформационная система также позволяет прокладывать оптимальный путь для ремонтных бригад к месту аварии. Каждой бригаде придан мобильный комплекс БПЛА, который оснащен БПЛА малого радиуса действия, для локализации и мониторинга места аварии.

Функционирование системы будет обеспечиваться БПЛА, которые будут с заданной периодичностью и графиком производить мультиспектральную съемку объектов энергосистемы.

Отдельно стоит рассмотреть задачу движения БПЛА вдоль линий ЛЭП, с использованием датчиков электромагнитного поля. Такая система позволит повысить точность локации и мониторинга, при этом обеспечивает автономность и устойчивость маршрута вне зависимости от наличия и качества канала связи или условий приема данных поступающих их систем геопозиционирования. Также применение такого метода позиционирования позволяет существенно упростить решение задачи подзарядки энергетических накопителей БПЛА в процессе мониторинга, не прерывая его.

В настоящее время, известны запатентованные технические решения, целью которых является обеспечение управления движением БПЛА с помощью измерения напряженности электрического (ЭП) или магнитного поля (МП) [69-70]. Данные решения могут быть использованы и для разработки методов мониторинга объектов энергетической системы Украины. Такие методы предусматривают создание паспортов – эталонов, описывающих функционирование ЛЭП и высоковольтных подстанций в штатном режиме. Данные паспорта – эталоны включают как мультиспектральные изображения исследуемых объектов, так и карты уровней напряженности электрического и магнитного полей, полученных с помощью расчетов и измерений на определенных расстояниях над линиями ЛЭП, а также на определенных расстояниях над высоковольтными подстанциями. Сравнение регистрируемых данных с эталоном исследуемого объекта, (с помощью специализированного ПО) позволит также принимать оперативные решения по его текущему состоянию: устранять возникшие нарушения, наличие которых может привести к аварийным от-

казам, или находить места аварий, если их не удалось избежать.

В паспорт ЛЭП целесообразно включить карты расположения систем защитного заземления высоковольтных подстанций, имеющих ключевое значение для обеспечения безопасности функционирования персонала и оборудования. Причем, такие карты должны быть получены в результате измерений напряженности МП, таким образом, карта будет отражать истинное расположения системы защитного заземления. Это даст возможность оценить степень надежности защиты исследуемого объекта системой защитного заземления в различных аварийных режимах и, при необходимости, разработать рекомендации по восстановлению ее вышедших из строя участков, а также ее доукомплектованию и модернизации. Для получения достоверной информации о текущем состоянии системы защитного заземления к системе необходимо подсоединить генератор токов и измерять напряженность МП. Измеренные данные будут использоваться специализированным ПО, в качестве исходных, для синтеза изображения линий равного потенциала и напряженности ЭП на поверхности земли. По данным картинам может быть проведен анализ надежности существующей системы защитного заземления.

Полученные карты распределений напряженностей ЭП и МП при работе ЛЭП и высоковольтных подстанций и системы защитного заземления могут быть использованы для составления планов безопасного перемещения технического персонала высоковольтных подстанций по их территории.

Для разработки методов электромагнитного мониторинга энергетической системы необходимо рассмотреть методики расчета напряженности ЭП и МП как при отсутствии персонала в зоне их действия, так и при их наличии. При этом в основном целесообразно использовать численные методы расчета ЭП и МП, однако в большинстве случаев могут быть применены аналитические методы.

При расчете напряженности электрического поля ЛЭП с помощью аналитических методов нужно принять следующие допущения:

- провода ЛЭП полагаются параллельными бесконечно длинными цилиндрами, заряд которых равномерно распределен вдоль их осей;

- напряжение на проводах ЛЭП изменяется по синусоидальному закону с частотой 50 Гц;

- сдвиг фаз во времени между напряжениями проводов ЛЭП  $120^\circ$ ;

- поверхность земли считается плоской, а самая земля по отношению к воздуху абсолютно электропроводной и имеющей нулевой потенциал;

- наличие опор, сооружений, технических и биологических объектов в зоне ЛЭП не учитывается;

- наличие дополнительных тросов (грозозащитных, компенсационных, и т.п.) не учитывается;

- считается, что провода ЛЭП находятся в воздухе с относительной диэлектрической проницаемостью, равной;

- действующие значения напряженности электрического поля определяются у плоскости, которая перпендикулярна направлению проводов ЛЭП, в области наибольшего приближения проводов к земле.

При принятых предположениях значения потенциалов, удельных зарядов и напряженности ЭП могут быть записанные в символической форме для комплексных значений, а электрическое поле представлено как сумма электрических полей проводов ЛЭП и их зеркальных отображений относительно поверхности земли

В последние годы значительно возрос интерес к измерениям температуры с помощью тепловизоров. Тепловизоры используются в электроэнергетике в тех случаях, когда необходим контроль теплового состояния объекта или необходимо бесконтактное измерение температуры. Широкое применение тепловизоры получили в энергетике, строительстве и промышленности.

Тепловой мониторинг основан на регистрации и анализе температуры контролируемых объектов. Главным условием его применения является наличие в контролируемом объекте тепловых потоков. Процесс передачи тепловой энергии, выделение или поглощение тепла в объекте приводит к тому, что его температура изменяется относительно окружающей среды. Основным параметром, который несет информацию о режиме работы объекта и наличии дефектов, при тепловом мониторинге является распределение температуры по поверхности объекта.

Принцип действия тепловизора основан на преобразовании ИК излучения в электрический сигнал, который усиливается и затем воспроизводится на мониторе в виде цветной картины распределения температуры.

**Выводы.** Использование беспилотных летательных аппаратов для безопасности функционирования линий электропередачи позволяет осуществить дистанционную регистрацию излучений с помощью специальной аппаратуры: фотографической, оптико-электронной или радиоэлектронной. Благодаря мониторингу регистрируются и анализируются не одиночные снимки, а их серии или непрерывные последовательности (видеопоток), которые могут отличаться ракурсом, обзорностью, временем съемки и спектральным диапазоном, благодаря чему обеспечивается более детальное и точное исследование объекта. Также возможно измерение напряженности электрического и магнитного полей вдоль трассы полета. Использование БПЛА позволяет прогнозировать старение ЛЭП, которое приводит к снижению пропускной способности, и как следствие к ограничению поставок электроэнергии конечному потребителю. Одной из основных причин этого является деградация линейных габаритов ЛЭП, которые происходят по причинам: изменения рельефа подстилающей поверхности, строительства различных сооружений и зарастания и роста культурного слоя.

## Список литературы

1. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. / Р.С. Арбузов. – Н.: Наука, 2009. – 136 с. 2. Skarbek L., Zak A., Ambroziak D. Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system / Skarbek L., Zak A., Ambroziak D. // 7th European Workshop on Structural Health Monitoring July 8-11, 2014. La Cité, Nantes, France. P. 663 – 670. 3. Li L. The UAV intelligent inspection of transmission lines / Li L. // International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015). P. 1542 – 1545. 4. Adabo G. J. Unmanned aircraft system for high voltage power transmission lines of Brazilian electrical system / Adabo G. J. // AUVSI's Unmanned Systems 2013. Washington (USA).

2. Skarbek L., Zak A., Ambroziak D. Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system [Proc. of the 7th European Workshop on Structural Health Monitoring] 2014. La Cité, Nantes, France. pp. 663 – 670. 3. Li L. The UAV intelligent inspection of transmission lines [Proc. of the International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics] 2015. pp. 1542 – 1545. 4. Adabo G.J. Unmanned aircraft system for high voltage power transmission lines of Brazilian electrical system // AUVSI's Unmanned Systems 2013. Washington (USA). 2013.

Поступила (received) 27.01.2017

## References (transliterated)

1. Arbuzov R. S., Ovsyannikov A. G. [Modern methods of diagnostics of overhead power lines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 136 p.

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Використання безпілотних літальних апаратів для безпеки функціонування ліній електропередачі / О.Г. Гриб, А.А. Зуєв, С.Ю. Шевченко, С.В. Швець, Т.С. Ієрусалімова, О.В. Бортніков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017.– № 5 (1325). – С. 19 – 23. Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Использование беспилотных летательных аппаратов для безопасности функционирования линий электропередачи / О.Г. Гриб, А.А. Зуев, С.Ю. Шевченко, С.В. Швець, Т.С. Иерусалимова, А.В. Бортников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017.– № 5 (1325). – С. 19 – 23. Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349.**

**The use of unmanned aerial vehicles for the safe functioning of transmission lines / O.G. Gryb, , A.A. Zuev, S.Yu. Shevchenko S.V. Shvets, T.S. Ierusalimova, A.V. Bortnikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 5 (1325). – P. 19 – 23 – Bibliogr.: 4. – ISSN 2224-0349.**

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

**Гриб Олег Герасимович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації енергосистем.

**Гриб Олег Герасимович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой автоматизации энергосистем.

**Gryb Oleg Gerasimovych** – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", head of the Department automation of electric power systems.

**Зув Андрій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматики та управління в технічних системах.

**Зув Андрей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры автоматики и управления в технических системах.

**Zuev Andrey Alexandrovych** – candidate of technical Sciences, associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor Department of automatics and control in technical systems.

**Шевченко Сергій Юрійович** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії.

**Шевченко Сергей Юрьевич** – доктор технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры передачи электрической энергии

**Shevchenko Sergey Yurievych** – Doctor of Technical Sciences, associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of Department transmitting electrical energy

**Швец Сергій Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації енергосистем.

**Швец Сергей Викторович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры автоматизации энергосистем.

**Shvets Sergey Viktorovich** – candidate of technical Sciences, associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate Professor of Department of automation of electric power systems.

**Іерусалімова Тетяна Сергіївна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри автоматизації енергосистем

**Иерусалимова Татьяна Сергеевна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры автоматизации энергосистем.

**Ierusalimova Tatiana Sergeevna** – candidate of technical Sciences, National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer of Department of automation of electric power systems.

**Бортніков Олександр Вікторович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», інженер кафедри автоматизації енергосистем

**Бортников Александр Викторович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», инженер кафедры автоматизации энергосистем.

**Bortnikov Alexander Viktorovych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", engineer of Department of automation of electric power systems.



УДК 621.315

А. Г. ГУРИН, И. А. КОСТЮКОВ, Е. С. МОСКВИТИН, В. П. СКИБИН, Ю. Г. ГОНТАРЬ

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ИЗОЛЯЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ ЛИНЕЙНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ И КОНЦЕВЫХ РАЗДЕЛКАХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ**

Пропонується метод визначення неоднорідностей у твердій ізоляції лінійних високовольтних ізоляторів та кінцевих розділок силових кабелів коли існує можливість визначити місце виходу еквіпотенціальних ліній електричного поля на поверхню ізоляції. Показано, що еквіпотенціальна лінія вносить на поверхню ізоляційної конструкції інформацію про внутрішню структуру ізоляції. Запропоновано по визначеним потенціалам на поверхні ізоляції від імпульсу напруги ладанної форми визначити його спектр у заданих точках поверхні і шляхом обробки суми та різниці спектрів у різних точках поверхні визначити наявність неоднорідностей у внутрішніх шарах ізоляції.

**Ключові слова:** електрична ізоляція силових кабелів, неоднорідності у внутрішніх шарах ізоляції.

Предлагается метод определения неоднородностей в изоляционном материале линейных изоляторов и концевых разделках силовых кабелей, когда существует возможность определить выход эквипотенциальной линии электрического поля на поверхность слоя изоляции. Показано, что эквипотенциальная линия несет информацию о внутренней структуре слоя изоляции. Предлагается по измеренным на поверхности изоляции потенциалам, при подаче импульса напряжения заданной формы, определять спектр измеренного импульса и путем суммирования спектров в измеряемых точках поверхности определять наличие неоднородностей внутри изоляционного слоя.

**Ключевые слова:** электрическая изоляция кабелей, неоднородности во внутренних слоях изоляции.

Insulation of electrical equipment is represented by different types of dielectric materials. It is shown that for majority of electrical insulating structures with axial symmetry, the change in the coordinates of the output of equipotentials to the surface of insulation is due to the presence of an inhomogeneity in the insulating layer. The offset of the equipotential lines is related to the horizontal or vertical orientation of the inclusions. When a rectangular voltage pulse is fed to the central electrode on the measuring loop, which repeats the shape of the equipotential line, a voltage pulse is induced, the shape change of which and its spectrum characterize the degree of heterogeneity of the insulating layer. This paper presents a non-destructive method for heterogeneity determination in insulation material which is based on analysis of the offset of the equipotential lines. Equipotential reflects processes occurring within the insulating layer as the form of equipotential is supposed to change in case of presence of heterogeneity. Knowing the spectral composition of the voltage pulse measured on the ring and the time constants of possible inclusions, one can judge the propagation of a given inclusion in the insulating layer under investigation.

**Key words:** insulation of power cables, heterogeneity of insulation.

**Введение.** Электрическую изоляцию электрооборудования линий электропередач, станций и подстанций обеспечивают твердые электроизоляционные материалы органического и неорганического происхождения. Для обеспечения равной электрической прочности и равномерного распределения токов утечки по поверхности изоляционная конструкция выполняется осесимметричной, когда внутренним электродом является токоведущий стержень высоковольтный электрод цилиндрической формы или жила силового кабеля, а внешним электродом служит крепежный фланец или концевая разделка экрана кабеля. В этих частях изоляции возникает повышенная напряженность электрического поля не только при перенапряжениях, но и в рабочем режиме. Здесь происходит ускоренное старение материала изоляции. Ситуацию усугубляет образование в твердой изоляции воздушных и водных включений, наличие микровключений различных примесей. Такие включения вызывают искажение картины электрического поля, усиливая напряженность поля или ослабляя ее как в толще изоляции, так и на ее поверхности, что вызывает местные пробои (частичные разряды) и ускоряет прорастание водных триингов.

Известны различные способы определения инородных включений, но чаще всего получить такую информацию без разрушения конструкции сложно, а неразрушающие методы дают интегральную характеристику, не указывая место расположе-

ния включения. В статье предлагается для неразрушающего контроля наличия включений в изоляционном слое использовать информацию, которую дают эквипотенциальные линии, выходя с толщи изоляции на ее поверхность. Место выхода эквипотенциали на поверхность зависит от геометрических размеров электродов (например, жилы кабеля и экрана), от влияния наличия примеси (прорастающий дендрит от экрана от экрана к жиле, или газовое включение вдоль слоя изоляции). Это вызывает смещение эквипотенциали на поверхности слоя изоляции в зависимости от преобладания того или иного типа включений. Информацию об изменении потенциала эквипотенциальной линии можно получить если на цилиндрической поверхности изоляции разместить металлический электрод в виде кольца, который повторяет форму эквипотенциальной линии. Для того, чтобы картина электрического поля не искажалась, кольцо должно быть в виде тонкого проводника, совпадающего с эквипотенциальной поверхностью по всей поверхности контакта. Перемещая кольцо по поверхности изоляционного слоя можно определить расположение потенциала по исследуемой длине концевой разделки или линейного изолятора.

При наличии органических или неорганических включений эквипотенциаль будет претерпевать изменения, поскольку каждый вид включения представляет частичную емкость со своей постоянной времени [1].

$$\tau = RC = \varepsilon\varepsilon_0\rho \quad (1)$$

где  $C_v$  – геометрическая емкость включения,  $R_v$  – общее сопротивление участка изоляции, включающее объемное и поверхностное сопротивления,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость включения,  $\rho$  – объемное сопротивление материала включения.

При подаче на исследуемый объект короткого импульса с крутым фронтом (намного меньше 1 мкс) можно считать что на распределение потенциала в слое изоляции влияет только электронная поляризация поскольку другие виды поляризации имеют постоянные времена превышающие длительность воздействия импульса. Таким образом, эквипотенциаль в данный момент времени отражает процессы, происходящие внутри изоляционного слоя. Зная спектральный состав импульса напряжения измеряемого на кольце и постоянные времена возможных включений можно судить о распространении данного включения в исследуемом слое изоляции.

**Цель работы.** Показать возможность определения наличия микровключений и неоднородностей в изоляции электротехнических устройств путем изучения спектрального состава импульса напряжения, получаемого в точке прохождения эквипотенциальных линий на поверхности слоя изоляции.

**Свойства эквипотенциальной линии электрического поля.** Кроме известных свойств [3] эквипотенциальная линия может служить источником информации о составе изоляционного слоя, его однородности. Проходя по внутренним слоям изоляции разделки кабеля, эквипотенциальная линия выходит на поверхность, являясь результатом воздействия каждого элемента в структуре изоляции, способных изменять геометрические координаты ее прохождения в слое изоляции. В зависимости от наличия продольных или поперечных включений точки выхода на поверхность разделки будут смещаться влево или вправо от своего устойчивого состояния [4]. Кроме того, различная реакция основного материала изоляции и включений из-за различных постоянных времени поляризации приводит к изменению спектрального состава регистрируемого импульса. Очищенный от помех сигнал позволяет получить информацию о величине включений и их составе.

На рис. 1 показана блок-схема экспериментальной установки для исследования концевой разделки силового кабеля.

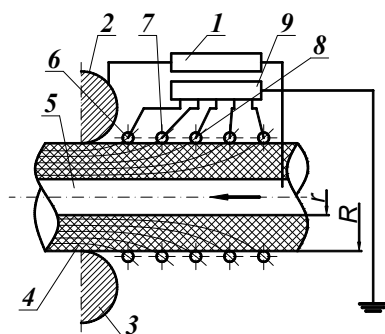


Рис. 1 – Блок-схема экспериментальной установки  
Между токоведущей жилой кабеля 3 и электродом 2 приложен импульс напряжения от генератора прямоугольных импульсов 1. Эквипотенциальные линии, проходя через слой изоляции 4, выходят на поверхность изоляции в точках 7, 8, где установлены кольцевые измерители потенциала, повторяющие форму эквипотенциальных линий. Сигнал, снимаемый с кольца, передается на регистрирующий блок 9, позволяющий определить амплитуду и спектр сигнала. Наличие включения 5, изменяет как амплитуду, так и спектр сигнала.

На рис. 2 а приведена конструкция проходного изолятора ИП – 10/630.

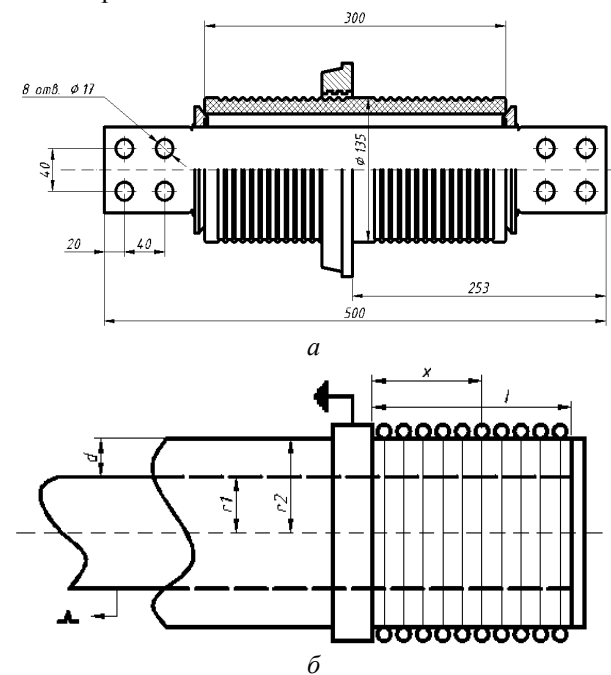


Рис. 2 – Объект исследования для разработки методики определения неоднородностей в изоляционном материале линейных изоляторов: а – конструкция проходного изолятора ИП – 10/630; б – расположение кольцевых электродов

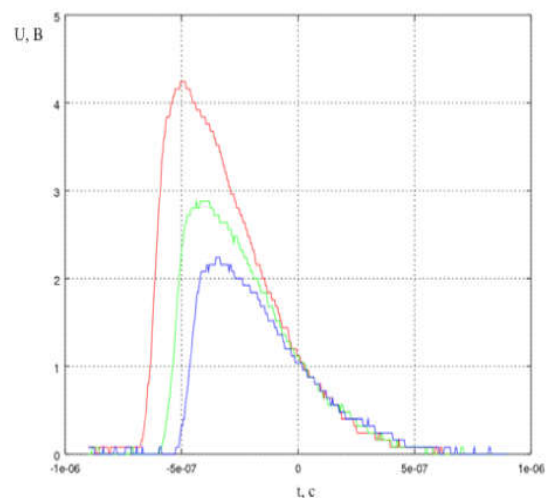


Рис. 3 – Форма импульсов напряжения в различных точках эквипотенциалей изолятора ИП – 10/630.

При приложении импульса напряжения между токоведущим стержнем и фланцем на кольцевых электродах 1-10 на поверхности изолятора получим импульсы по форме аналогичные сигналам в точках 1, 2, 3. Амплитуды импульсов в точках 1-10 изменяются по соотношению [3].

$$\varphi = U \frac{sh(l-x)}{sh(\gamma l)} \quad (2)$$

где  $\varphi$  – потенциал в точке измерения,  $U$  – амплитуда приложенного импульса напряжения,  $l$  – длина расчетной части поверхности,  $x$  – расстояние до точки установки измерительного кольца,  $\gamma$  – полная проводимость единицы длины изоляционного слоя.

Форма измеряемого импульса искажается за счет разнородных компонентов фарфорового изолятора со своими постоянными времени. Электрическая прочность и диэлектрические свойства фарфора зависят от многих причин. Кварц, глина, каолин улучшают диэлектрические свойства, полевошпат ухудшает. Важным показателем качества фарфора является пористость, что может привести к образованию водных включений. Каждый из этих материалов будет иметь свою постоянную времени, которая определяется объемным сопротивлением и диэлектрической постоянной компонента фарфора.

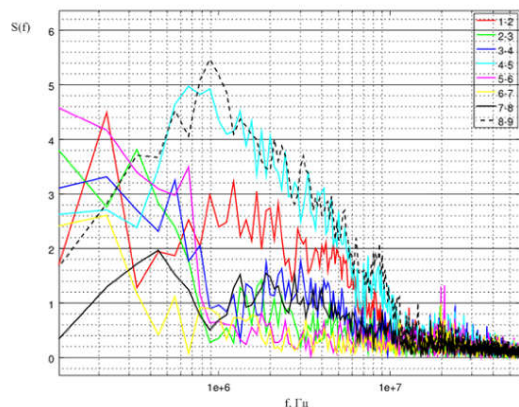


Рис. 4 – Спектральный состав электротехнического фарфора в измеряемых точках

Показанный на рис. 4 спектральный состав фарфора, измеренный в 9 точках поверхности, свидетельствует о разнородности состава.

**Выводы.** Показано, что для большинства электроизоляционных конструкций с осевой симметрией изменение координат выхода эквипотенциалей на поверхность изоляции связано с наличием неоднородности в изоляционном слое. Смещение эквипотенциальных линий связано с горизонтальной или вертикальной ориентацией включений.

При подаче на центральный электрод прямоугольного импульса напряжения на измерительном витке, который повторяет форму эквипотенциальной линии, индуктируется импульс напряжения, изменение формы которого и его спектр характеризуют степень неоднородности изоляционного слоя.

#### Список литературы

1. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с. 2. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля / В. А. Говорков. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 463 с. 3. Сукачев А. П. Теоретические основы электротехники. Часть 1. Физические основы электротехники / А. П. Сукачев. – Х.: Изд-во Харьковского университета им. А. М. Горького, 1959. – 463 с. 4. Дмитриевский В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции / В. С. Дмитриевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.

#### References (transliterated)

1. Tareev B. M. *Fizika dielektricheskikh materialov* [Physics of dielectric materials] Moscow, Jenergoizdat Publ, 1982. 320 p. 2. Govorkov V. A. *Jelektricheskie i magnitnye polja* [Electric and magnetic fields] Moscow, Gosjenergoizdat Publ, 1960. 463 p. 3. Sukachev A. P. *Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki*. [Electrical engineering] Harkov.: Har'kovskogo universiteta im. A. M. Gor'kogo. Publ. 1959. 463 p. 4. Dmitrievskij V. S. *Raschet i konstruirovaniye jelektricheskoy izoljacii* [Calculation of electrical insulation] Moscow, Jenergoizdat Publ, 1981. 392 p.

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Неруйнівний метод визначення неоднорідностей в ізоляційному матеріалі лінійних ізоляторів та силових кабелів / А. Г. Гурін, І. О. Костюков, Є. С. Москвітін, В. П. Скібін, Ю. Г. Гонтар // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 31 (1253). – С. 25–28. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Неразрушающий метод определения неоднородностей в изоляционном материале линейных изоляторов и концевых разделках силовых кабелей / А. Г. Гурин, И. А. Костюков, Е. С. Москвитин, В. П. Скибин, Ю. Г. Гонтар // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 31 (1253). – С. 25–28. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2224-0349.**

**A non-destructive method for heterogeneity determination in insulation material / A. G. Gurin, I. A. Kostyukov, E. S. Moskvitin, V. P. Skibin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetic reliability and energy efficiency. – Kharkov: NTU "KhPI", 2015. – No. 5 (1235). – P. 25–28. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2224-0349.**

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

**Гурин Анатолій Григорович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПИ», м. Харків. тел. 70-76-663

**Гурин Анатолій Григорьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроизоляционной и кабельной техники НТУ «ХПИ», г. Харьков. тел. 70-76-663

**Gurin Anatolij Grigorjevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

**Костюков Иван Александрович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПИ», м. Харків. e-mail: Kostiukow.Ivan@yandex.ru. 70-76-544

**Костюков Иван Александрович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроизоляционной и кабельной техники НТУ «ХПИ», г. Харьков.

**Kostiukov Ivan Aleksandrovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", e-mail: iakostiukow@gmail.com.

**Москвітін Євген Сергійович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПИ», м. Харків.

**Москвитин Евгений Сергеевич** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроизоляционной и кабельной техники НТУ «ХПИ», г. Харьков.

**Moskvitin Evgenij Serhiyovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",

**Скібін Валерій Павлович** – старший викладач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПИ», м. Харків. тел. 70-76-544

**Скибин Валерий Павлович** – старший преподаватель кафедры электроизоляционной и кабельной техники НТУ «ХПИ», г. Харьков. тел. 70-76-544

**Skibin Valerij Pavlovich** – lecturer at National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

УДК 621.311

А. В. ДЯЧЕНКО Г. А. СЕНДЕРОВИЧ

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ В УЗЛАХ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Запропоновано метод аналізу дискретної кривої напруги, який дозволяє виявити і оцінити екстремуми, і отримати більш повну інформацію про зміни напруги зокрема виділити ділянки кривої, напругу на яких можна вважати постійною. Розроблено методику його реалізації, яка дозволяє визначити основні характеристики кривої напруги, а також основні параметри коливання напруги. Це дослідження може бути використано в подальшому для визначення місця розташування джерела коливань напруги.

**Ключові слова:** крива напруги, якість електроенергії, коливання напруги, розмах зміни напруги, локальні екстремуми, ділянка монотонності, вектор-матриця.

Предложен метод анализа дискретной кривой напряжения, который позволяет выявить и оценить экстремумы, и получить более полную информацию об изменениях напряжения в частности выделить участки кривой, напряжение на которых можно считать постоянным. Разработана методика его реализации, которая позволяет определить основные характеристики кривой напряжения, а также основные параметры колебания напряжения. Это исследование может быть использовано в дальнейшем для определения местоположения источника колебаний напряжения.

**Ключевые слова:** кривая напряжения, качество электроэнергии, колебания напряжения, размах изменения напряжения, локальные экстремумы, участок монотонности, вектор-матрица.

The purpose of work is development of a method of the analysis of a discrete curve of tension and development of a technique which allows to define the main of tension performance curve, and also key parameters of fluctuation of tension. The known methods of the analysis of the curves having local extrema can be used for assessment of fluctuations of tension, in particular, for definition of location of a source of fluctuation of tension. As showed results of a research the analysis of change of a curve of tension, except assessment of extremums and identification of sites of a curve of tension on which fluctuations are not observed allows to receive also other parameters characterizing fluctuations of tension, in particular: a range of change of tension number of fluctuations of tension for an observation time slice, a recurrence rate of changes of fluctuations of tension, an interval between changes of tension. The method is developed for the analysis of a discrete curve of tension which allows to reveal and estimate extrema and to obtain more complete information on changes of tension in particular to allocate sites of a curve on which tension can be considered constant. This research can be used further for definition of location of a source of fluctuations of tension.

**Key words:** tension curve, quality of the electric power, fluctuation of tension, scope of change of tension, local extrema, monotony site, vector matrix.

**Постановка задачі и анализ публикаций.**

Роль енергетики в сучасній Україні незвичайно велика. Для успішного втілення в життя плану розвитку країни в першу чергу необхідно забезпечити збільшення енергообеспеченості. При цьому особе увагу слід приділяти електросбереженню, екологічності, маневреності і надійності роботи енергетичного обладнання. В електроенергетиці одним з найважливіших аспектів електросбереження являється покращення якості електроенергії (КЕ). Одним з показателів котрий безпосередньо пов'язаний з КЕ являється коливання напруги (КН).

Як показав аналіз інформаційних джерел [1-5] відомі методи аналізу кривих, які мають локальні екстремуми, можна використовувати для оцінки КН в частині, для визначення місця розташування джерела КН в відповідності з критеріями, описаними в [6].

**Цель.** Розвиток методу аналізу дискретної кривої напруги і розробка методики, що дозволяє визначити основні характеристики особливості кривої напруги, і основні параметри КН.

**Результати досліджень.** Виділимо на кривій зміни напруги  $U(t)$  два довільних локальних екстремумів – максимум і мінімум (рис. 1 а). При дискретній обробці інформації ця крива представлена в вигляді ламаної  $U(\tau_i)$ . Перша похідна напруги буде пропорційна

дискретному зміні напруги  $\Delta U(\tau_i)$ , відповідно до  $i$ -го інтервалу усереднення  $\tau_i$  (рис. 1 б):

$$U'(\tau_i) \sim \Delta U(\tau_i). \quad (1)$$

Друга похідна напруги буде пропорційна дискретному зміні першої похідної (рис. 1 в):

$$U''(\tau_i) \sim \Delta U'(\tau_i). \quad (2)$$

В силу того, що розглядається функція  $U(\tau_i)$  не є монотонною, точка локального екстремуму може бути знайдена з точністю до інтервалу усереднення  $\tau$  по факту зміни знака першої похідної, що відповідає достаточному умові наявності екстремуму [6]:

$$\begin{aligned} \text{sign} U'(\tau_{i+1}) &= -\text{sign} U'(\tau_i) \text{ или} \\ \text{sign} \Delta U(\tau_{i+1}) &= -\text{sign} \Delta U(\tau_i). \end{aligned} \quad (3)$$

Якщо при цьому похідна змінює свій знак з плюса ( $\text{sign} \Delta U(\tau_i) > 0$ ) на мінус ( $\text{sign} \Delta U(\tau_{i+1}) < 0$ ), то спостерігається максимум функції  $U(\tau_i)$ , якщо з мінуса ( $\text{sign} \Delta U(\tau_i) < 0$ ) на плюс ( $\text{sign} \Delta U(\tau_{i+1}) > 0$ ) – мінімум.

Оцінити знак екстремуму можна за допомогою другої похідної. В точці екстремуму спостерігається максимум, якщо друга похідна  $U''(\tau_i)$  отрицательна.

тельна или согласно (1):

$$\Delta U'(\tau_i) < 0. \tag{4}$$

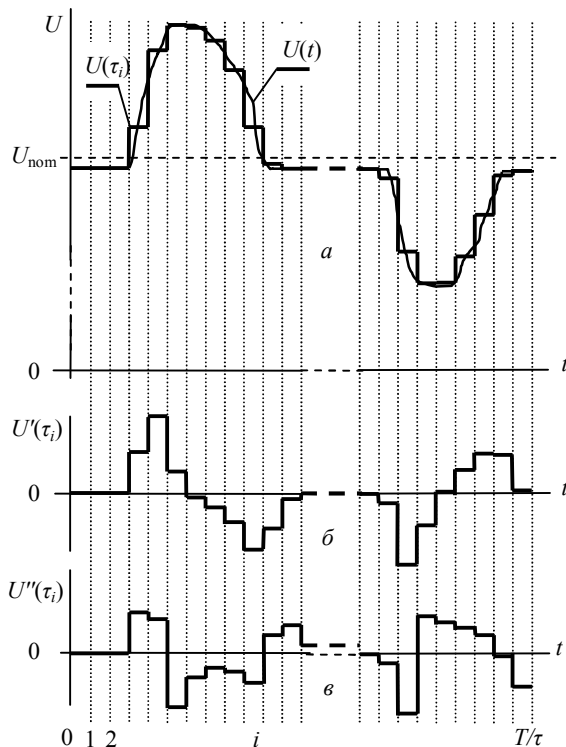


Рис. 1 – Дискретные характеристики колебаний напряжения *a* –  $U(\tau_i)$ , первой  $U'(\tau_i)$ , *б* – второй, *в* –  $U''(\tau_i)$  производных напряжения

В точке экстремума наблюдается минимум, если вторая производная  $U''(\tau_i)$  положительна:

$$\Delta U'(\tau_i) > 0. \tag{5}$$

Рассмотрим кривую изменения напряжения  $U(t)$  на кратковременном интервале наблюдения  $T_{sh}=10$  мин. Анализ кривой напряжения  $U(\tau_i)$  можно начать с расчета первой  $U'(\tau_i)$  и второй  $U''(\tau_i)$  производных напряжения, алгоритм которого представлен на рис. 2. Исходные данные: дискретная характеристика кривой напряжения  $U(\tau_i)$  в функции номера  $i$ -го интервала усреднения  $\tau$  за интервал наблюдения  $T$ , которая задана в виде матрицы-столбца  $\bar{U}[(T/\tau)+1]$  для диапазона от  $i = 0$  до  $i = T/\tau$ . Вместо матрицы  $\bar{U}$  может быть использована информация текущего режима.

В начале расчета также задается интервал усреднения  $i = 1$  и предшествующее значение второй производной напряжения  $\Delta U2 = 0$ . Если кратковременный интервал наблюдения  $T_{sh}$  рассчитывает-

ся как составная часть в ходе длительного наблюдения или постоянного мониторинга, то начальное значение второй производной известно – это вторая производная последнего интервала  $\tau$  предшествующего интервала наблюдения  $T_{sh} - \Delta U2 = \Delta U(T/\tau, 3)$ . Допущение  $\Delta U2 = 0$  приведет к погрешности по величине на первом шаге, что может иметь значение для определения  $\text{sign} U'(\tau_i)$  только на первом шаге и только, если начало расчета попадет на точку экстремума. Результаты расчета вносятся в матрицу дискретных параметров напряжения  $\Delta \bar{U}$  размерностью  $(T/\tau) \times 3$ . Количество строк соответствует числу интервалов усреднения, количество столбцов – дискретным показателям кривой напряжения:  $\Delta U(i, 1)$  – напряжение  $U(\tau_i)$ ,  $\Delta U(i, 2)$  – первая производная напряжения  $U'(\tau_i)$ ,  $\Delta U(i, 3)$  – вторая производная напряжения  $U''(\tau_i)$ .

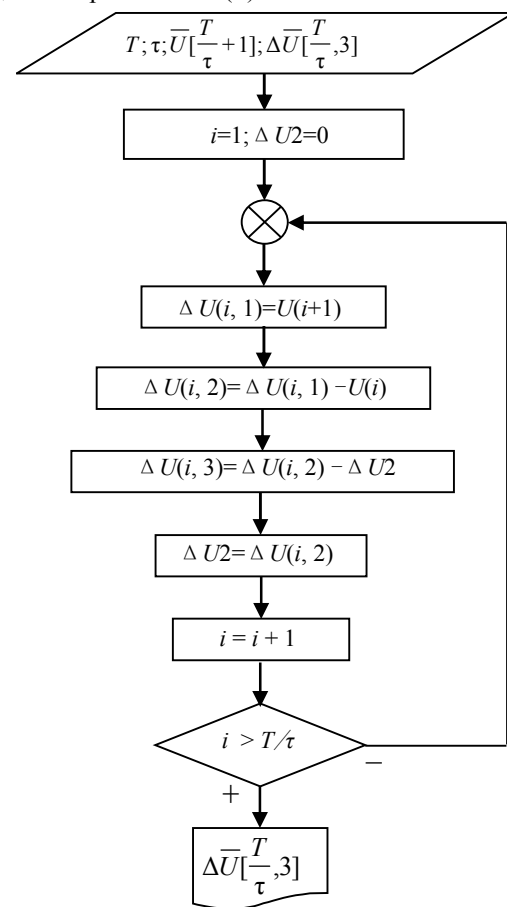


Рис. 2 – Алгоритм расчета производных

Анализ кривой напряжения при наличии КН производится с дискретностью выделенного интервала усреднения  $\tau$  (рис. 3) путем обработки материалов матрицы дискретных параметров напряжения  $\Delta \bar{U}$ .

Результаты анализа фиксирует вектор-матрица  $\bar{M}$  размерностью  $T/\tau$ ,  $i$ -й элемент которой  $M(i) = 1$  соответствует началу,  $M(i) = 2$  – концу участка кривой, на котором не наблюдаются КН,  $M(i) = 3$  ло-

кальному максимуму  $M(i) = 4$  – локальному минимуму.

В начале расчета обнуляется матрица  $\bar{M} = 0$ , задаются исходные значения номера интервала усреднения  $i = 1$  и количество выявленных интервалов усреднения  $j = 0$ , на которых не наблюдаются КН.

Необходимым условием отсутствия КН является равенство нулю первой производной напряжения, что описывается элементарным логическим высказыванием [7]:

$$X1 := U'(\tau_i) = 0.$$

(6)

Условие не является достаточным, так как оно выполняется и в точках экстремумов.

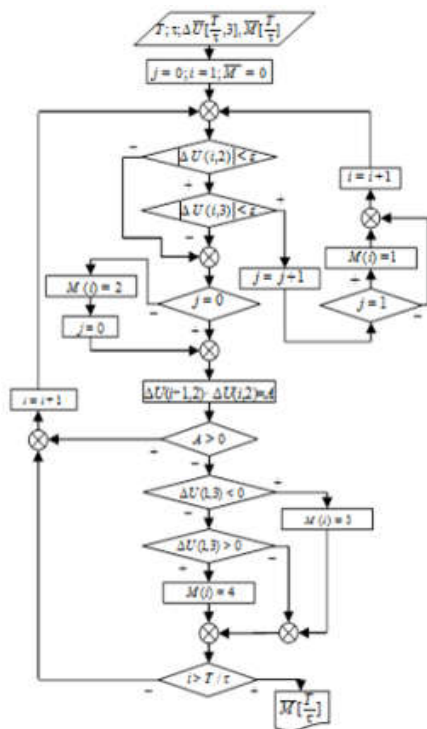


Рис. 3 – Алгоритм анализа кривой напряжения на интервале наблюдения  $T_{sh}(T)$

При этом, в отличие от точек экстремумов, в случае отсутствия КН вторая производная, как и первая, равна нулю, что соответствует элементарному логическому высказыванию:

$$X2 := U''(\tau_i) = 0.$$

(7)

Условием отсутствия КН можно считать конъюнкцию элементарных высказываний (6) и (7), чему соответствует логическое уравнение [8]:

$$Y = X1 \wedge X2 = 1.$$

(8)

Если с математической точки зрения условия (6), (7) не вызывают сомнения, то для их технической реализации нулевое значение должно быть

заменено некоторой обосновано малой величиной  $\epsilon$ . С учетом данного уточнения элементарные высказывания (6), (7) примут вид (см. рис. 3):

$$X1 := |\Delta U(i,2)| < \epsilon.$$

(9)

$$X2 := |\Delta U(i,3)| < \epsilon.$$

(10)

В случае выполнения условия совпадения (8) запускается отсчет интервалов усреднения  $j$ , на протяжении которых отсутствуют КН. В матрице  $\bar{M}$  записывается информация  $M(i) = 1$ , означающая начало участка без КН. Счет интервалов  $j = j + 1$  прекратится, когда условие (8) перестанет выполняться ( $Y = 0$ ). При этом в матрице  $\bar{M}$  записывается информация  $M(i) = 2$ , означающая окончание участка без КН, и обнуляется отсчет интервалов усреднения:  $j = 0$ . Весь расчет сопровождается независимым от особенностей кривой напряжения отсчетом интервалов усреднения  $i = i + 1$ .

Участки монотонного изменения кривой напряжения определяются по факту совпадения полярности первых производных напряжения в предшествующем ( $i - 1$ ) и текущем ( $i$ ) интервалах усреднения, что характеризует положительный знак их произведения  $A > 0$ :

$$\Delta U(i-1,2) \cdot \Delta U(i,2) = A.$$

(11)

Несоблюдение условия  $A > 0$  расценивается как нарушение монотонности кривой (3) - экстремум или горизонтальный участок огибающей среднеквадратичного напряжения. Так как горизонтальный участок кривой исключен ранее, то остается экстремум.

По знаку второй производной напряжения локальный экстремум идентифицируется как максимум, если:

$$\Delta U(i,3) < 0.$$

(12)

Или как минимум, если:

$$\Delta U(i,3) > 0.$$

(13)

При выполнении условия (12) в матрице  $\bar{M}$  записывается информация  $M(i) = 3$ , означающая фиксацию локального максимума, в случае выполнения условия (13) –  $M(i) = 4$ , означающая фиксацию локального минимума [9]. Так как в начале расчета  $\bar{M}$  обнуляется, элементы матрицы, соответствующие участкам монотонного изменения кривой напряжения, имеют нулевые значения:  $M(i) = 0$ .

Анализ кривой напряжения на интервале наблюдения  $T_{sh}(T)$  заканчивается по факту прохождения последнего интервала усреднения –  $i > T/\tau$ . Кроме оценки экстремумов и выявления участков кривой напряжения, на которых не наблюдаются

КН, анализ кривой изменения напряжения  $U(t)$  позволяет получить другие параметры, характеризующие КН [4], в частности: размах изменения напряжения  $\delta U_t$ , число колебаний напряжения  $m$  за интервал времени наблюдения  $T$ , частоту повторения изменений колебаний напряжения  $F_{\delta U_t}$ , интервал между изменениями напряжения  $\Delta t_{i,i+1}$ .

Для расчета параметров, характеризующие КН, воспользуемся результатами анализа кривой напряжения, зафиксированными в матрицах дискретных параметров напряжения  $\overline{\Delta U}$  и локальных экстремумов  $\overline{M}$ , полученными по рассмотренным выше алгоритмам (см. рис. 2, и 3). Алгоритм расчета для кратковременного интервала кратковременного наблюдения  $T_{sh}$  (обозначено  $T$ ) приведен на рис. 4. За основу расчета принято определение размаха изменения напряжения, который в процентах вычисляется по формуле:

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{nom}} \cdot 100. \tag{14}$$

где  $U_i$  и  $U_{i+1}$  значения следующих один за другим экстремумов или экстремума и горизонтального участка огибающей среднеквадратичных значений напряжения основной частоты.

Расчет учитывает требования [10], предъявляемые к определению  $\delta U_t$ . В частности, о минимальном интервале между изменениями напряжения и об определении наибольшего размаха КН за период кратковременного интервала наблюдения  $T_{sh}$  ( $\delta U_t = \delta U_{tmax}$ ).

Согласно требованию о минимальном интервале между изменениями напряжения, если интервал времени между окончанием одного изменения и началом следующего, происходящего в том же направлении, менее  $\Delta t_{min} = 30$  мс, то эти изменения рассматриваются как одно. В общем виде интервал между изменениями напряжения определяется по формуле:

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i+1} - t_i. \tag{15}$$

где  $\Delta t_i$ ,  $t_{i+1}$  - начальный момент следующих один за другим изменений напряжения.

На практике определение  $\Delta t_{i,i+1}$  зависит от формы кривой изменения напряжения, что учтено в алгоритме расчета.

Расчет производится для каждого  $i$ -го интервала усреднения  $\tau$  в диапазоне изменения от  $i = 1$  до  $i = T/\tau$ . Оценка монотонности кривой  $i$ -го интервала, включая горизонтальные участки, осуществляется по факту отсутствия записи в матрице  $\overline{M}$  о каких-либо изменениях при ее формировании после обнуления:

$$X0 := M(i) = 0. \tag{16}$$

Участок монотонности прослеживается до интервала, в котором условие (16) не выполняется, после чего производится определение  $\Delta t_{i,i+1}$  (обозначено  $\Delta t$ ) способом, зависящим от формы кривой.

Если участок монотонности попадает на горизонтальный участок кривой, то его окончание будет определено условием окончания участка без КН:  $X2 := M(i) = 2$ . Интервал между изменениями напряжения определяется в этом случае равен длине горизонтального участка, что соответствует логическому уравнению:

$$Y1 = X2 \rightarrow \Delta t = \Delta i \cdot \tau = (i - j) \cdot \tau$$

(17)

где  $j$  - маркер начала интервала  $\Delta t$ .

Если участок монотонности заканчивается началом горизонтального участка ( $X1 := M(i) = 1$ ), локальным максимумом ( $X3 := M(i) = 3$ ) или локальным минимумом ( $X4 := M(i) = 4$ ), то интервал  $\Delta t$  попадает на участки роста или понижения напряжения.

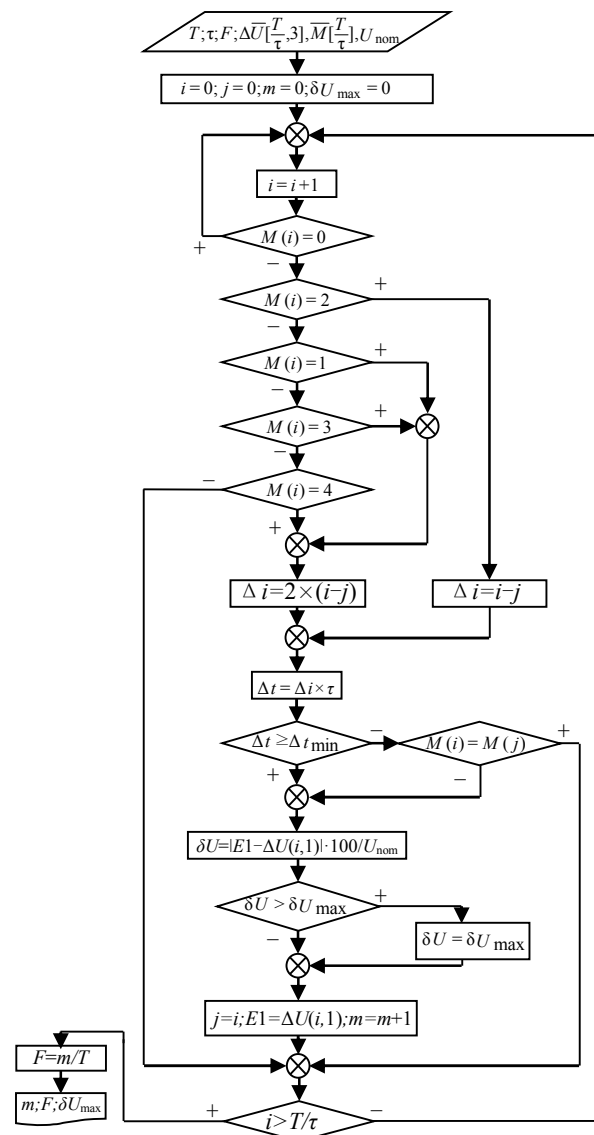


Рис. 4. - Алгоритм расчета параметров КН



В случае дизъюнкции событий  $X1, X3, X4$  расстояние между изменениями напряжения рассчитывается как для треугольных периодических колебаний, что соответствует логическому уравнению:

$$Y2 = X1 \vee X3 \vee X4 \rightarrow \Delta t / 2 = \Delta i \cdot \tau = (i-j) \cdot \tau. \quad (18)$$

$$\Delta t \geq \Delta t_{\min} \quad (19)$$

Если условие (19) выполняется или не выполняется, но начало следующего изменения происходит в направлении противоположном предыдущему, то по формуле (14) производится расчет размаха изменения напряжения  $\delta U_i$ . Если условие (19) не выполняется и начало следующего изменения происходит в том же направлении, что и предыдущее, расчет  $\delta U_i$  блокируется. Запрет производится по факту совпадения вида текущего локального экстремума напряжения с видом предыдущего:  $Y3 := M(i) = M(j)$ . Логическое уравнение расчета локального значения  $\delta U_i$  можно записать в виде:

$$(Y1 \vee Y2) \wedge \bar{Y3} \rightarrow \delta U = |E1 - \Delta U(i,1)| \cdot 100 / U_{\text{ном}}. \quad (20)$$

где  $E1$  - значение напряжения на интервале усреднения  $j$  предыдущего изменения;

$\Delta U(i,1)$  - значение напряжения на интервале усреднения текущего изменения.

Для оценки соответствия показателей качества электроэнергии установленным нормам в условиях эксплуатации требуется, чтобы наибольшее значение размаха напряжения  $\delta U_i$ , определяемое в течение минимального интервала измерений  $T_{sh}$ , не превышало предельно допустимые значения. Поэтому в расчете выделяется наибольшее значение размаха напряжения:

$$\delta U_i = \delta U_{\max} \text{ за } T_{sh}. \quad (21)$$

Количество нарушений монотонности, при которых выполняется условие (20), рассматривается как количество изменений напряжения  $m$ . В конце расчета производится суммирование всех изменений напряжения  $m$  на всем кратковременном интервале наблюдения  $T_{sh}$  и рассчитывается частота повторения изменений:

$$F_{\delta U_i} = \frac{m}{T_{sh}} \quad (22)$$

**Выводы.** В предложенном методе анализа кривой напряжения учитываются особенности ломанной кривой, и используются закономерности непрерывной кривой для анализа кривой дискретной. Кроме того в расчете учитываются параметры характеризующие КН, которые определены ГОСТ 13109-97, такие как: размах изменения напряжения число колебаний напряжения за интервал времени наблюдения частота повторения изменений колеба-

ний напряжения, интервал между изменениями напряжения.

Предложенный метод может быть использован, кроме анализа изменения кривой напряжения, для анализа колебаний других параметров режима, в частности для кривой активной мощности.

#### Список литературы

1. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике / *И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев.* - М., Наука, 1964. - 608 с. 2. *Вирченко Н. А.* Графики функций. Справочник / *Н. А. Вирченко, И. И. Ляшко, К. И. Швецов.* - Киев, Наукова думка, 1979. - 320 с. 3. *Гусак А. А.* Справочник по высшей математике / *А. А. Гусак, Г. М. Гусак, Е. А. Бричкова.* - Минск, ТетраСистемс, 1999. - 640 с. 4. *Корн Г.* Справочник по математике / *Г. Корн, Т. Корн.* - М., Наука, 1973. - 832 с. 5. *Вигодский М. Я.* Справочник по высшей математике / *М. Я. Вигодский.* - М., Астрель АСТ, 2006. - 991 с. 6. *Сендерович Г. А.* Метод определения расположения источника колебаний напряжения в электрической сети / *Г. А. Сендерович, А. В. Дяченко* // *Електротехніка і Електромеханіка.* Раз. Електричні станції, мережі і системи - 2016. - № 3. - С. 58-62. 7. *Криницкий Н. А.* Программирование и алгоритмические языки / *Н. А. Криницкий, Г. А. Миронов, Г. Д. Фролов.* - М., Наука, 1979, - 512 с. 8. *Митник Ю. Ш.* Программирование и алгоритмические языки / *Ю. Ш. Митник, А. С. Хмельницкий.* - М., Наука, 1984, - 368 с. 9. *Баула В. Г.* Основы программирования и алгоритмические языки / *В. Г. Баула, Н. Д. Васюкова, В. В. Тюляева,* [и др.]. - Энергоатомиздат Москва, 1991, - 398 с. 10. *Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97.* - [Введ. в Украине 01.01.2000]. - Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. - 30 с. - (Межгосударственный стандарт стран СНГ).

#### References (transliterated)

1. Bronstein I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike* [Reference book on mathematics]. Moscow, Nauka, Publ., 1964. 608 p. 2. Virchenko N. A., Lyashko I. I., Shvetsov K. I. *Grafiki funkciy*. *Spravochnik* [Function graphs. Reference book]. Kiev, Naukova dumka, Publ., 1979. 320 p. 3. Gusak A. A., Gusak G. M., Brichikova E. A. *Spravochnik po vysshej matematike* [Reference book on the higher mathematics]. Minsk, TetraSystems, Publ., 1999. 640 p. 4. Korn G. Korn T. *Spravochnik po matematike* [Reference book on mathematics]. Moscow, Nauka, Publ., 1973. 832 p. 5. Vigodsky M. J. *Spravochnik po vysshej matematike* [Reference book on the higher mathematics]. Moscow, Astrel' AST, Publ., 2006. 991 p. 6. Senderovich G. A., Diachenko A. V. Metod opredelenija raspolozhenija istochnika kolebanij naprjazhenija v jelektricheskoj seti [The method of determining the location of the source of voltage fluctuations]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2016. no.3, pp. 58-62. 7. Krinitsky O. N., Mironov G. A., Frolov G. D. *Programmirovanie i algoritmicheskie jazykiki* [Programming and algorithmic languages]. Moscow, Nauka, Publ., 1979. 512 p. 8. Mitnick Y. W., Khmelnit-sky A. S. *Programmirovanie i algoritmicheskie jazykiki* [Programming and algorithmic languages]. Moscow, Nauka, Publ., 1984. 368 p. 9. Baula V. G., Vasjukova N. D., Tyulyaeva V. V., [et al.]. *Osnovy programirovanija i algoritmicheskie jazyki* [Bases of programming and algorithmic languages]. Energoatomizdat Moscow, Publ., 1991. 398 p. 10. *GOST 13109-97. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standard 13109-97. Electrical energy. Technical equipment electromagnetic compatibility. Quality standards for electrical energy in general use power systems]. Minsk, IPK Publishing house of standards, 1998. 30 p.

Поступила (received) 16.09.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Анализ изменения кривой напряжения в узлах общего присоединения электрической сети / Г. А. Сендерович, А. В. Дяченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017.– No 31 (1253). – С. 29 – 33. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2224-0349.

**Анализ изменения кривой напряжения в узлах общего присоединения электрической сети / Г. А. Сендерович, А. В. Дяченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017.– No 31 (1253). – С. 29 – 33. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2224-0349.

**Analysis of change of a curve of tension in clusters of the common accession of an electrical network / G. A. Senderovich, A. V. Diachenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 5 (1235). – P. 29–33. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2224-0349.

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

**Сендерович Геннадій Аркадієвич** – доктор технічних наук, професор кафедри, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: senderovichg@mail.ru

**Сендерович Геннадий Аркадьевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры автоматизации энергосистем, e-mail: senderovichg@mail.ru

**Senderovich Gennady Arkadievich** – Doctor of Engineering, professor of the department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Department of Power System Automation, e-mail: senderovichg@mail.ru

**Дяченко Олександр Васильович** – магістр, аспірант кафедри, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автоматизації енергосистем, тел. : +38 095 2098150, e-mail: [alex.7491@mail.ru](mailto:alex.7491@mail.ru).

**Дяченко Александр Васильевич** – магистр, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры автоматизации энергосистем.

**Diachenko Oleksandr Vasylovych** – master, post graduate of the department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», post graduate at the Department of Power System Automation, tel.: +38 095 2098150, e-mail: alex.7491@mail.ru.

УДК 621.355.1

**С. Ф. ЖУКОВ, А. И. ВАЖИНСКИЙ****АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ**

Проведено дослідження поведінки промислових об'єктів в умовах наявності транспортного запізнення в каналі зворотного зв'язку. Виконано математичне моделювання, досліджені частотні характеристики системи керування електротехнічним комплексом. Отримані теоретичні результати послужили основою для синтезу системи управління з ідентифікацією параметрів об'єкта і можливістю адаптивної настройки параметрів регуляторів.

**Ключові слова:** транспортне запізнення, частотна характеристика, адаптація параметрів, система управління, предиктор.

Проведено исследование поведения промышленных объектов в условиях наличия транспортного запаздывания в канале обратной связи. Выполнено математическое моделирование, исследованы частотные характеристики системы управления электротехническим комплексом. Полученные теоретические результаты послужили основой для синтеза системы управления с идентификацией параметров объекта и возможностью адаптивной настройки параметров регуляторов.

**Ключевые слова:** транспортное запаздывание, частотная характеристика, адаптация параметров, система управления, предиктор.

To improve the management of industrial objects and to eliminate the time delay in measuring channel it is advisable to develop a model that takes into account the dynamics of the process. We have obtained mathematical model in tabular form or in the form of equations. As a result, we have found pulsed or transient characteristic of the object, as well as the corresponding spectral characteristics, which are used for structural and parametric identification. Selecting an optimal model based on the adequacy of regulatory criteria of quality and sustainability with minimum complexity of the model. We found an array of data, which characterized the parameters of the control object. This allowed us to determine the character of transition processes. New analytical dependences, which were obtained by mathematical modeling and simulation, confirmed in experimental studies, and became the basis for the synthesis of software. Analytical descriptions of process, which included in the predictive control model of electrical equipment, allowed us to minimize the effect of time delay in the measurement channel.

**Key words:** identification, the adaptive control system, the frequency characteristics of the measurement channel, the time delay.

**Введение.** Одна из основных проблем в управлении технологическими объектами – это проблема временного рассогласования управляющих воздействий и информации, передаваемой по каналам обратной связи, обусловленные расстояниями между исполнительными механизмами и устройствами измерения. Решением может служить построение системы автоматической настройки и адаптации. Объективные сложности, связанные с аппаратной и программной реализацией адаптивных систем управления, идентификацией параметров объекта управления, на современном этапе развития микропроцессорных устройств могут быть преодолены [1]. Вышесказанное определяет необходимость проведения исследований поведения различных объектов в условиях наличия задержек в канале обратной связи, математического описания на основе результатов идентификации и синтеза систем управления, обеспечивающих заданные выходные параметры и требуемую устойчивость.

**Актуальность** Автоматическая настройка и адаптация параметров регуляторов дают эффективные решения актуальных задач построения систем управления электротехническими комплексами. На этом этапе возникают проблемы, связанные с качеством настройки, влиянием внешних возмущений [2]. С точки зрения теории построения систем автоматизации SCADA – системы представляют собой системы, работающие в информационном режиме. Применение таких систем в управляющем и супервизорном режимах позволяет улучшить качество управления комплексами и, как следствие, добиться повышения качества производимой продукции.

**Анализ предыдущих исследований.** При автоматической настройке и адаптации используются те же методы идентификации и расчета параметров регулятора, что и в ручном режиме, однако автоматизация этих процессов существенно повышает качество регулирования. Наиболее эффективными являются методы настройки с применением микропроцессорной техники, включенной в контур регулирования. В [3] рассмотрена идентификация в замкнутом контуре для регулятора с встроенной моделью, с применением итерационных методов; в [4] использован генетический алгоритм. Применение методик требует запоминания и исследования истории протекания процесса в системе. Основным недостатком нечетких, нейросетевых, генетических алгоритмов является сложность их настройки. Настройка таких систем основывается на составлении базы нечетких правил и обучения нейронной сети. Регуляторы с внутренней моделью и методика их настройки рассмотрены в [5], приведено сравнение характеристик регуляторов, рассмотрены случаи наличия запаздывания в измерительном канале системы управления. Использование предиктора Смита для интегрирующих процессов предложено в работе [6]. Анализ данных источников показал, что для повышения качества управления сложными процессами необходимо применение систем автоматической настройки и адаптации.

**Материалы исследования.** Применение стандартных регуляторов в производственных технологиях даёт неудовлетворительные результаты, когда время запаздывания регулятора значительно превышает допустимое. Для исключения негативного влияния запаздывания на качество регулирования

применим алгоритм, который известен как «предиктор Смита». Выражения, описывающие объект управления при использовании предиктора Смита [2]:

$$P(p) = P_o(p)e^{-p\tau}, \tag{1}$$

$$\frac{\tau}{\tau + T} > 0,2 \dots 0,5, \tag{2}$$

$$R(p) = \frac{R_{PI}(p)}{1 + R_{PI}(p)(1 - e^{-p\tau})} \tag{3}$$

На рис. 1 представлена схема реализации предиктора Смита

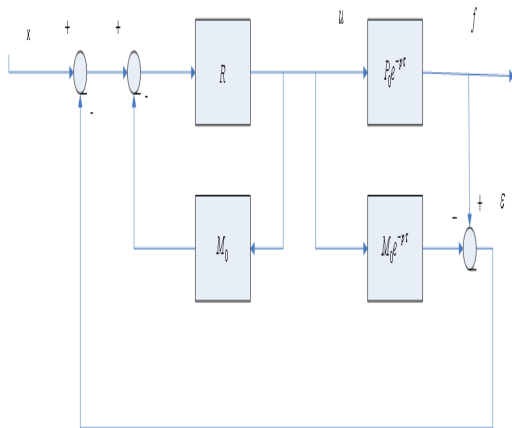


Рис. 1 – Схема управления с предиктором Смита

Здесь  $R$  – регулятор,  $P_0 e^{-p\tau}$  – передаточная характеристика объекта управления,  $M_0$  – модель объекта,  $x$  – текущее значение переменной,  $f$  – задание преобразователя частоты. Принцип работы системы состоит в следующем. Предположим, что модель абсолютно точна. Тогда разность сигналов на выходах модели и объекта будет равна нулю ( $\epsilon = 0$ ). В таком случае непосредственно из схемы на рис.2.23 можно получить выражение (4):

$$f = P_0 e^{-p\tau} \left( \frac{R}{1 + R M_0} \right) x = \left( \frac{P_0 R}{1 + P_0 R} \right) x. \tag{4}$$

В этом выражении член  $\left( \frac{P_0 R}{1 + P_0 R} \right)$  представляет собой передаточную функцию системы без транспортной задержки. А это значит, что звено с транспортной задержкой не входит в контур обратной связи и не влияет на устойчивость и быстродействие системы, то есть происходит регулирование в контуре с моделью без задержки, а транспортная задержка только добавляется к полученному результату. Рассмотрим теперь работу предиктора Смита без предположения  $\epsilon = 0$ . В этом случае схему на рис. 2 можно описать следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} f &= P_0 e^{-p\tau} R(x - \epsilon - M_0 u), \\ \epsilon &= f - M_0 e^{-p\tau} u, \\ f &= P_0 e^{-p\tau} u. \end{aligned} \tag{5}$$

откуда получаем выражение (6)

$$f = \left[ \frac{P_0 R}{1 + R M_0 + R(P_0 - M_0)e^{-p\tau}} \right] e^{-p\tau} u. \tag{6}$$

Эквивалентная схема предиктора Смита представлена на рис. 2.

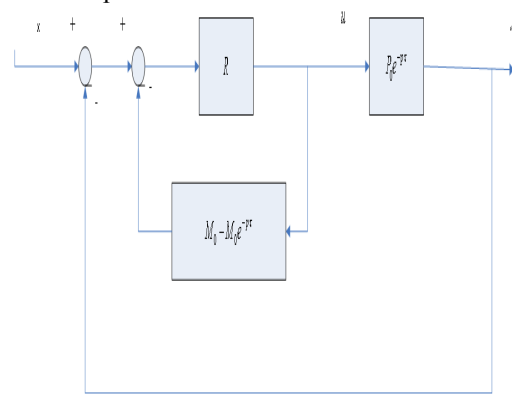


Рис. 2 – Эквивалентная схема предиктора Смита

В данной системе будем использовать схему управления с реакцией на время запаздывания (предиктор Смита). Если модель правильно идентифицирована, то с ее помощью можно предсказать выходную переменную, решая уравнения модели, т.е., не дожидаясь реакции объекта на управляющее воздействие [2,4].

Схема эксперимента с использованием модели объекта показана на рис. 3, где ОУ – объект управления, М – модель объекта.

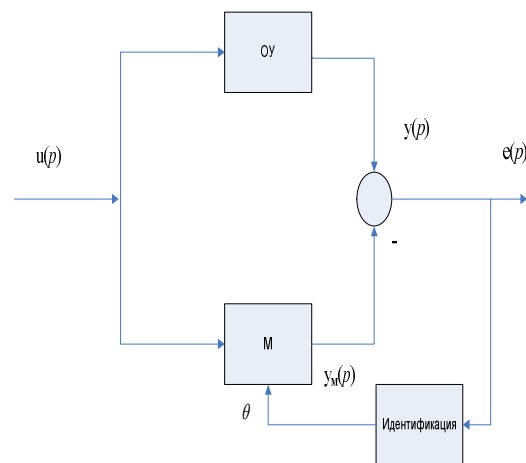


Рис. 3 – Схема проведения идентификации

Работа системы управления должна обеспечивать такой режим, в котором система устойчива. Устойчивость определяем по характеру переходного процесса и степени удаления системы от границы устойчивости. Для построения АФХ записывается передаточная функция разомкнутой системы

$$W(p) = W_p(p) W_{об}(p) = \frac{k_{об} k_p}{p} e^{-p\tau} об \left( 1 + \frac{1}{T_u p} \right). \tag{7}$$

Для получения частотных характеристик по передаточной функции выполняется подстановка  $P = \omega(j - m)$ , где  $m$  – степень колебательности системы. Тогда

$$W(m, j\omega) = \frac{k_{ia} k_p}{\omega(j-m)} e^{-\omega(j-m)\tau_{ia}} \left(1 + \frac{1}{T_e \omega(j-m)}\right) \quad (8)$$

С целью расчета частотных характеристик для различных значений частоты  $\omega$  составлена программа. Результаты работы программы проиллюстрированы рис. 4 – 6.

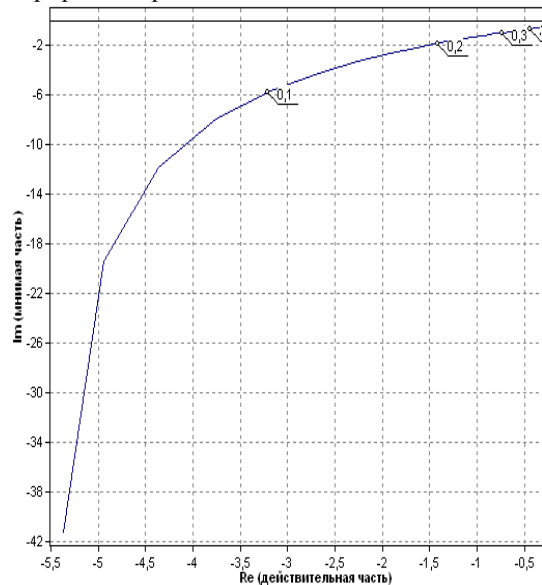


Рис. 4 – Годограф АФХ разомкнутой системы

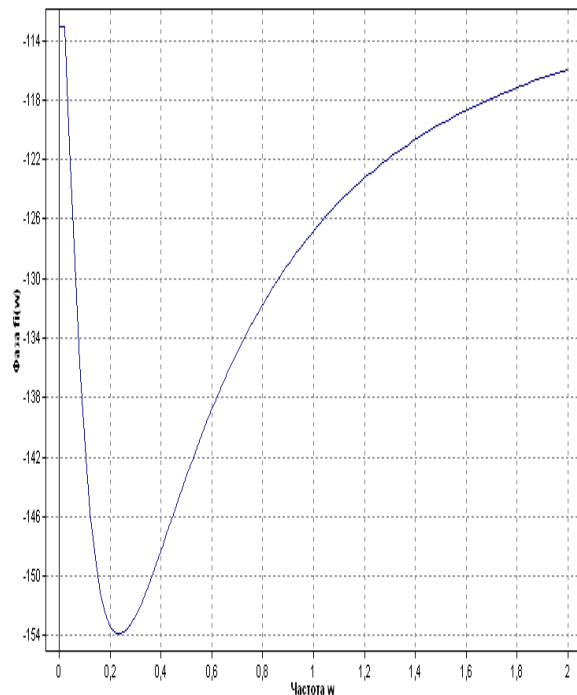


Рис. 5 – Годограф ФХ разомкнутой системы

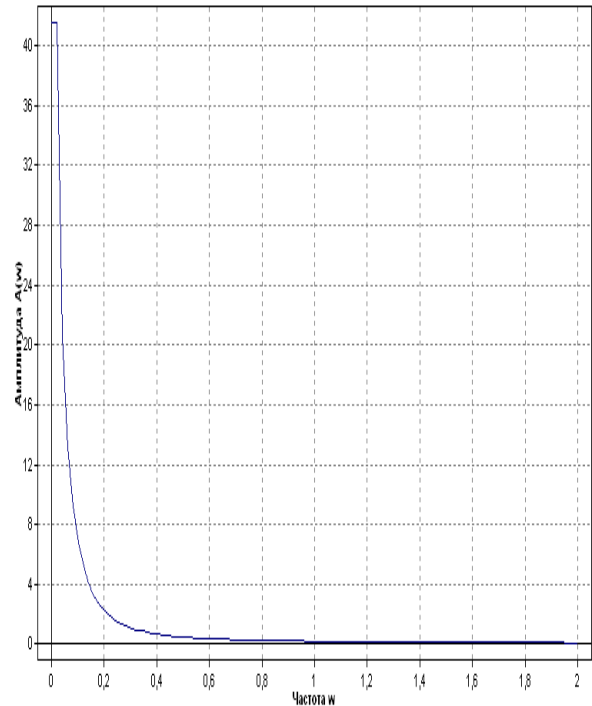


Рис. 6 – Годограф АЧХ разомкнутой системы

Объект управления описывается выражением

$$W_o(p) = \frac{0,95 \cdot e^{-8p}}{18,19 \cdot p^2 + 8,84 \cdot p + 1} \quad (8)$$

Перейдем от преобразований Лапласа к преобразованиям Фурье. Для этого сделаем замену  $\delta = j\omega$  в выражении

$$W_o(j\omega) = \frac{0,95 \cdot e^{-8j\omega}}{18,19 \cdot (j\omega)^2 + 8,84 \cdot j\omega + 1} \quad (9)$$

Разложим знаменатель (9) на множители, получим выражение

$$W_o(j\omega) = \frac{0,95}{18,19} \cdot \frac{e^{-8j\omega}}{(j\omega + 0,1792) \cdot (j\omega + 0,3068)} = \frac{0,0522 \cdot e^{-8j\omega}}{(j\omega + 0,1792) \cdot (j\omega + 0,3068)} \quad (10)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) имеет вид (11):

$$A(\omega) = |W(j\omega)|$$

$$A(\omega) = \frac{0,0522}{\sqrt{0,1792^2 + \omega^2} \cdot \sqrt{0,3068^2 + \omega^2}} \quad (11)$$

Годограф соответствующей АЧХ представлен на рис. 7.

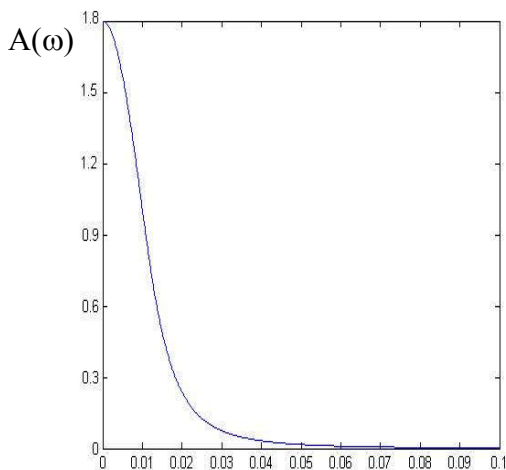


Рис. 7 – АЧХ исследуемой системы

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ)

$$\varphi(\omega) = -8 \cdot \omega - \arctg\left(\frac{\omega}{0.1792}\right) - \arctg\left(\frac{\omega}{0.3068}\right). \quad (12)$$

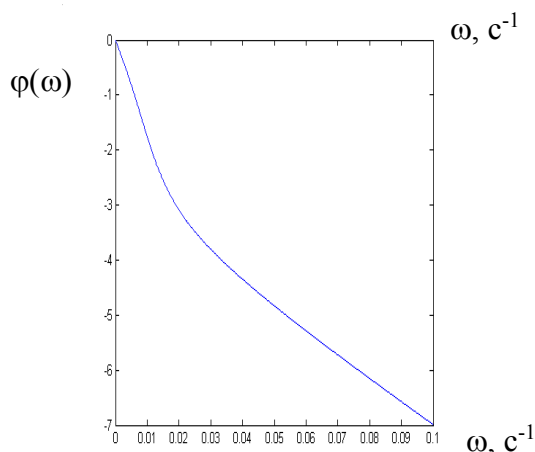


Рис. 8 – ФЧХ системы

Комплексная частотная характеристика (КЧХ):

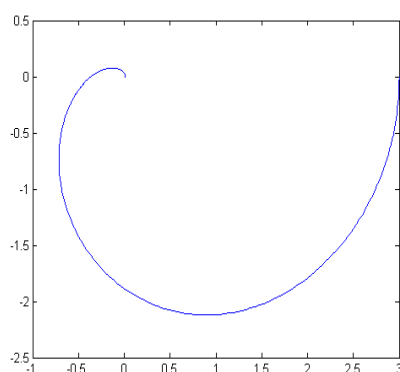


Рис. 9 – КЧХ системы

Результаты проведенных исследований и построения на их основе промышленных систем управления показали, что идентификация параметров системы управления электрическим оборудованием позволит производить автоматическую настройку и адаптацию коэффициентов регуляторов скорости вращения двигателей, входящих в состав оборудования. Идентификация выполняется с помощью анализа реакции на входной скачок, в замкнутом или разомкнутом контуре, по выбору пользователя. Обработанные системой визуализации данные служат основой для расчета частотной характеристики объекта, которая может быть отображена в виде диаграммы Боде, Найквиста. Отображаются также коэффициент передачи, постоянные времени и транспортная задержка (если есть) объекта.

#### Выводы:

1. Включение в предиктивную модель управления электрическим оборудованием аналитического описания системы позволяет учесть влияние временного запаздывания управляющих воздействий и повысить качественные показатели дозирования шихтовых материалов
2. Исследование переходных процессов в системе показало уменьшение времени регулирования и повышение запаса устойчивости, подтвердив эффективность применения усовершенствованной модели предиктора Смита
3. Повышение управляемости рядом объектов стало возможным благодаря применению системы управления электротехническим комплексом с адаптацией настроек регулятора
4. Дальнейшим направлением развития системы является сбор информации и углубление описания основных электротехнических комплексов металлургического производства с целью совершенствования диагностических возможностей и повышения качества регулирования систем управления.

#### Список литературы

1. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с. 19. 2. Краснов И.Ю. Исследование системы автоматического высокоточного дозирования сыпучих материалов / И.Ю. Краснов // Известия томского политехнического университета. – 2007. – № 4. – С. 108 – 112 3. Karakawa K. Joint design method of closed-loop identification and IMC structure for temperature control system with time delay / Karakawa K. Abe N., Ichihara H. // SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. 5-7 Aug. 2002. Vol. 3. P. 1592 – 1595. 4. Shigemasa T., Yukitomo M., Kuwata R. A model-driven PID control system and its case studies // Proceedings of the 2002 International Conference on Control Applications. 2002. Vol. 1. P. 571 – 576. 5. Pereira D.S., Pinto J.O.P. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control // Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings. 2005 IEEE/ASME International Conference on. 2005. P. 801 – 806 6. Гриценко А.В. Улучшение качества алгоритма управления "Предиктор Смита" посредством автоматического вычисления времени запаздывания / А.В. Гриценко // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №12. – С. 32 – 37.

## References (transliterated)

1. Denisenko, V.V. *Kompyuternoye upravleniye tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniyem* [Computerizing process control, experiment, equipment] Moscow, Hotline – Telecom Publ, 2009 608 p. 2. Krasnov I.Yu. [Research of automatic precision dosing system of bulk materials], *Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2007. no. 2, pp.108-112. 3. Karakawa K., Abe N., Ichihara H. Joint design method of closed-loop identification and IMC structure for temperature control system with time delay // SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. 5-7 Aug. 2002. Vol. 3. P. 1592 – 1595. 4. Shigemasa T., Yukioto M., Kuwata

R. A model-driven PID control system and its case studies // Proceedings of the 2002 International Conference on Control Applications. 2002. Vol. 1. P. 571 – 576. 5. Pereira D.S., Pinto J.O.P. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control // Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings. 2005 IEEE/ASME International Conference on. 2005. P. 801 – 806. 6. Gritsenko A.V. 2004, [Improving the quality of the control algorithm "Smith Predictor" by automatically calculating the time delay], *Promyshlennyye ASU i kontrolyery*, no.12, pp.32-37.

Поступила (received) 15.02.2017

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Адаптивна система керування електротехнічним комплексом / С. Ф. Жуков, А. І. Вазинський** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2017.– No 31 (1253). – С. 35 –39. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349.

**Адаптивная система управления электротехническим комплексом / С. Ф. Жуков, А. И. Вазинский** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2017.– No 31 (1253). – С. 35 –39 . Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349.

**Adaptive control system of electrical equipment /S. F. Zhukov, A. I. Vazhinsky** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No. 5 (1235). – P. 35 –39 . – Bibliogr.: 6. – ISSN 2224-0349.

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

**Жуков Станіслав Федорович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Електричні станції» ; тел.: (0629) 41-10-47; e-mail [sfg@quantum.com.ua](mailto:sfg@quantum.com.ua)

**Жуков Станіслав Федорович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Электрические станции», тел.: (0629) 41-10-47; e-mail [sfg@quantum.com.ua](mailto:sfg@quantum.com.ua)

**Zhukov Stanislav Fedorovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Department of Electric power plant тел.: (0629) 41-10-47; e-mail [sfg@quantum.com.ua](mailto:sfg@quantum.com.ua)

**Вазинський Антон Іванович** – кандидат технічних наук, начальник дільниці, ПрАТ «МК «АЗОВ-СТАЛЬ», тел. : (0629) 46-64-87; e-mail: [new0304@rambler.ru](mailto:new0304@rambler.ru)

**Вазинский Антон Иванович** – кандидат технических наук, начальник участка, ПрАТ «МК «АЗОВ-СТАЛЬ», тел. : (0629) 46-64-87; e-mail: [new0304@rambler.ru](mailto:new0304@rambler.ru)

**Vazhinsky Anton Ivanovych** – Candidate of Technical Sciences , foreman of section, PJSC Azovstal Iron & Steel Works, tel (0629) 46-64-87; e-mail [new0304@rambler.ru](mailto:new0304@rambler.ru)

УДК 621.314

О. А. ЗАГАЙНОВА, Г. М. СЕРДЮКОВА

**АНАЛІЗ ЗМІН ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВВОДІВ ПРОТЯГОМ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Виконаний аналіз особливостей змін характеристик якості ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів протягом тривалої експлуатації. Показано, що швидкість зміни значень показників якості змінюється на різних проміжках часу. Інтенсивність процесів старіння ізоляції залежить від умов експлуатації високовольтних вводів. Отримані результати дозволяють оптимізувати математичні моделі прийняття рішень при оцінці стану високовольтних вводів, за рахунок обліку наявності зв'язків між показниками діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції вводів силових трансформаторів. Виконано перевірку відхилення від лінійності часових рядів для діелектричних показників якості ізоляції високовольтних вводів.

**Ключові слова:** ввід, ізоляція, однорідний часовий ряд, кореляційне відношення, дисперсійний аналіз, відхилення від лінійності.

Выполнен анализ особенностей изменений характеристик качества изоляции конденсаторного типа высоковольтных вводов в течение длительной эксплуатации. Показано, что скорость изменения значений показателей качества меняется на разных промежутках времени. Интенсивность процессов старения изоляции зависит от условий эксплуатации высоковольтных вводов. Полученные результаты позволяют оптимизировать математические модели принятия решений при оценке состояния высоковольтных. Выполнена проверка отклонения от линейности временных рядов для диэлектрических показателей качества изоляции высоковольтных вводов.

**Ключевые слова:** ввод, изоляция, однородный временной ряд, корреляционное отношение, дисперсионный анализ, отклонение от линейности.

The results of periodic measurements of quality indicators of condenser type insulation high-voltage bushings considered as a time series containing information about changing the value of this indicator since the installation of inputs and the current moment. The task of forming an array of statistically homogeneous time series reduces to finding a combination of time series of indicators that would provide the maximum value of the correlation ratio for a given time interval. For the formation of groups of bushings with the same drift velocity indicators of quality insulation used criterion of maximum empirical correlation ratio. It was formed several data sets for each indicator of quality insulation, for which as a result of the testing was found the maximum value of the correlation ratio. To evaluate the effectiveness of the performing procedure statistically homogeneous time series analysis was performed tightness stochastic association between indicators of the quality of the bushings insulation and time of exploitation. It was found that under conditions of continuous operation, the aging of the high-voltage inputs isolation takes place at different speed.

**Keywords:** high-voltage bushing, insulation, time series, correlation ratio, analysis of variance, deviation from linearity.

**Вступ.** Високовольтні вводи усіх класів напруги, за кількістю встановленого маслonaповненого обладнання в енергосистемах, є наймасовішим обладнанням. З досвіду експлуатації енергосистем випливає, що надійність вводів є визначальним фактором при оцінці надійності роботи всієї енергосистеми. Аналіз статистичних даних по роботі електроустановок показує, що велика частина відмов і пошкоджень доводиться на високовольтні маслонаповнені вводи – до 50 %, причому, 73 % на вводи трансформаторів [1,2]. Визначення фактичного стану високовольтних вводів засноване на вимірі значень контрольованих параметрів ізоляції, для яких визначаються тривожні і аварійні рівні сигналів [3]. Порівняння дійсних значень із встановленими рівнями тривоги і попередніми вимірами дає оцінку зміни стану контрольованих вводів. Організований, таким чином, діагностичний контроль, має на меті запобігання аварійного відмови високовольтних вводів, визначення їх стану та прогнозування залишкового ресурсу як одного з головних показників надійності [4-6]. Підвищення достовірності контролю неможливо без побудови адекватної ймовірнісної моделі багатовимірної інформації, яка використовується при навчанні системи технічного контролю та діагностики. Достовірність контролю тим вище, чим адекватніше модель об'єкта контролю реальної фізичної моделі його функціонування. Це особливо важливо при вирішенні завдань, які пов'язані з оцінкою ступеня старіння і прогнозування залишкового ресурсу ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів на тривалих інтервалах експлуатації.

зани з оцінкою ступеня старіння і прогнозування залишкового ресурсу ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів на тривалих інтервалах експлуатації. Формування моделей старіння ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів вимагає врахування характерних особливостей залежностей показників від часу експлуатації.

**Аналіз основних досягнень і літератури.** Механізми старіння трансформаторного масла досить докладно описані в [7]. У той же час питання, пов'язані з дослідженням залежностей показників якості ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів від тривалості експлуатації, не знайшли широкого висвітлення в літературі. Удосконалення методів діагностики стану ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів принципово не можливо без урахування закономірностей старіння ізоляції в умовах тривалої експлуатації та аналізу впливу експлуатаційних чинників на швидкість старіння ізоляції [5]. У зв'язку з цим дослідження процесів старіння ізоляції вводів в умовах реальних експлуатаційних дій протягом тривалої експлуатації є актуальним і важливим завданням.

**Мета роботи.** Дана стаття присвячена аналізу особливостей дрейфу показників якості ізоляції конденсаторного типу високовольтних вводів на тривалих інтервалах експлуатації.

**Методи дослідження.** При аналізі швидкості зміни значень показників якості ізоляції вводи на



тривалих інтервалах експлуатації важливо оцінити, чи є швидкість старіння ізоляції постійною на всьому досліджуваному проміжку або ж вона змінюється. В першу чергу, це пов'язано з необхідністю прогнозувати залишковий ресурс ізоляції. Для цього необхідно мати модель, яка буде характеризувати зміну значень характеристик ізоляції в залежності від тривалості експлуатації та від інших факторів. Якщо швидкість старіння ізоляції незмінна, то для прогнозування можна використовувати лінійну модель. При умові, що швидкість старіння ізоляції змінюється на тривалому проміжку експлуатації, лінійна модель не припустима, і необхідно підбирати більш складний вид залежності.

Виконати подібного роду оцінку можливо шляхом перевірки загальної лінійної гіпотези. Загальний вигляд такої моделі можна представити рівнянням [8]:

$$Y_{ji} = \alpha + \beta \cdot t_j + \delta_j + Z_{ji}, \quad (1)$$

де  $Y_{ji}$  - результат одного з вимірювань показника  $Y$  в момент часу  $t_j$ , ( $i = 1, \dots, n_j$ ,  $j = 1, \dots, k$ );

$k$  - кількість груп з  $n_i$  багаторазових вимірювань,

$\alpha, \beta$  - параметри лінійної регресії показника  $X$  на час експлуатації  $t$ ;

$\delta_j$  - відхилення від лінійності для регресії, яка використовується;

$Z_{ji}$  - випадковий залишок, що залежить як від похибок вимірювання, так і від впливу неконтрольованих факторів.

Початковими умовами моделі (1) є:

$$M[\delta_j] = M[Z_{ji}] = 0; \quad M[\delta_j^2] = \sigma_\delta^2; \quad M[Z_{ji}^2] = \sigma^2;$$

Всі  $\delta_j$  і  $Z_{ji}$  передбачаються незалежними величинами.

Модель (1) аналогічна моделі для односторонньої класифікації. Відхилення від лінійності  $\delta_j$  вважають систематичними. Число багаторазових вимірювань повинно бути (хоча б для однієї групи) не менш двох ( $n \geq 2$ ), що узгоджується з правилами проведення профілактичних випробувань [3], коли протягом року проводять, як мінімум, два виміри контрольованих показників.

Розкладання повної суми квадратів відхилень результатів вимірювання  $Y_{ji}$  від загальної середньої  $\bar{Y}$  [9] дозволяє перевірити лінійну гіпотезу ( $H_0: \delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_k = 0$ ), тобто відповідно до гіпотези  $H_0$  регресія  $Y(t)$  є лінійною.

Повну суму квадратів  $S_{\text{пов}}$  можна розбити на суму квадратів між групами  $S_1$  і суму квадратів всередині груп  $S_{\text{зал}}$ :

$$S_{\text{пов}} = S_1 + S_{\text{зал}} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ji} - \bar{Y})^2 = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ji} - \bar{Y}_j)^2 \quad (3)$$

У свою чергу, суму квадратів між групами  $S_1$  можливо розбити на суму квадратів для лінійної регресії і суму квадратів для середніх даного плану щодо регресії у відповідність з формулою:

$$S_1 = \beta^2 \sum_{j=1}^k n_j (t_j - \bar{t})^2 + \sum_{j=1}^k n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y} - \beta(t_j - \bar{t}))^2 \quad (4)$$

Результати дисперсійного аналізу для оцінки відхилення від лінійності наведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Таблиця дисперсійного аналізу

Джерело мінливості	Число ступенів свободи	Сума квадратів
Лінійна регресія	1	$\beta^2 \sum_{j=1}^k n_j (t_j - \bar{t})^2$
Відхилення від лінійності	$k-2$	$\sum_{j=1}^k n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y} - \beta(t_j - \bar{t}))^2$
Залишок	$\sum_{j=1}^k n_j - k$	$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ji} - \bar{Y}_j)^2$
Сума	$\sum_{j=1}^k n_j - 1$	$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ji} - \bar{Y})^2$

Позначення в таблиці 1:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^k n_j \cdot t_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})}{\sum_{j=1}^k n_j (t_j - \bar{t})^2}; \quad \bar{Y}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} Y_{ji}}{n_j}; \quad \bar{t} = \frac{\sum_{j=1}^k n_j t_j}{\sum_{j=1}^k n_j}$$

Лінійність регресії перевіряється шляхом обчислення критеріальної статистики  $F_{\text{роз}}$  і порівняння з  $F_{\text{кр}}$  - критичної з  $(k-2)$  та  $(\sum_{j=1}^k n_j - k)$  степені свободи.

Модель (1) враховує будь-яке відхилення від лінійної регресії. Якщо до проведення експерименту передбачається існування відхилення певного виду, то слід перевірити його вплив на використовуваний критерій.

Значення F-критерію визначається за формулою:

$$F_{\text{роз}} = \frac{(k-2)^{-1} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y} - \beta(t_j - \bar{t}))^2}{\left( \sum_{j=1}^k n_j - k \right)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ji} - \bar{Y}_j)^2}$$

**Результати чисельного моделювання.** В якості вихідних даних використовувались результати періодичного контролю стану трансформаторних вводів Харківської області та інших, загальним об'ємом 2995 вибірових значень. Ці дані можна розглядати як результати експерименту по старінню ізоляції вводів трансформаторів. Важливу перева-

гою профілактичних випробувань є те, що ці дані отримані в результаті експлуатаційних впливів і адекватно відображають реальні процеси старіння ізоляції. Однак використання цих даних в якості навчальних вибірок можливо лише після їх статистичної обробки. Важливою проблемою, яка виникає в ході подібної обробки, є забезпечення однорідності результатів періодичного контролю показників якості ізоляції вводів. Неоднорідність результатів періодичного контролю показників ізоляції вводів обумовлена, перш за все, різною швидкістю старіння ізоляції. Очевидно, що інтенсивність старіння ізоляції буде обумовлена завантаженням трансформаторів, температурою, напруженістю електричного поля, концентрацією кисню, вологи та інших хімічно агресивних середовищ. Статистичну неоднорідність часових рядів, обумовлених різним завантаженням вводів і, як наслідок, різними температурними умовами роботи ізоляції ілюструє рис. 1. На даному рисунку наведено залежності тангенса діелектричних втрат ізоляції вводів від часу експлуатації для вводів трьох трансформаторів підстанцій: «Безлюдівка», «Сімферопольська», «Олександрівська».

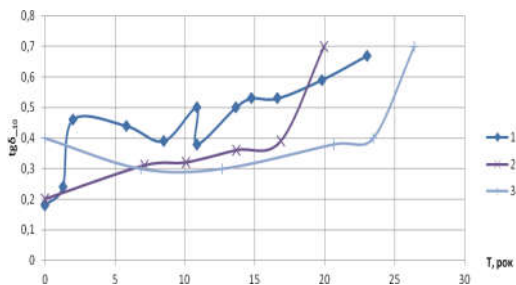


Рис. 1 – Залежність тангенса діелектричних втрат ізоляції вводів від часу експлуатації 1 - ввід фази А трансформатора підстанції «Сімферопольська», 2 - ввід фази А трансформатора підстанції «Олександрівська», 3 - ввід фази А трансформатора підстанції «Безлюдівка»

Як видно з рис. 1, не дивлячись на те, що дані вводи відпрацювали приблизно однаковий термін, спостерігаються значні відмінності значень показника на кожному часовому проміжку. На першому етапі досліджень для кількісної оцінки ступеня неоднорідності результатів випробувань використовувався коефіцієнт парної кореляції показника на час експлуатації. Коефіцієнт кореляції для ряду 1 (ввід фази А трансформатора ПС «Сімферопольська»), становить  $r = 0,46866$ , для другого ряду (ввід фази А трансформатора підстанції «Сімферопольська»)  $r = 0,875973$ , а для ряду 3 (ввід фази А трансформатора ПС «Безлюдівка»)  $r = -0,47382$ . Коефіцієнт кореляції об'єднаного масиву цих трьох рядів  $r = 0,39401$ , що значно нижче, ніж значення коефіцієнта парної кореляції для окремого ряду. В даному випадку зменшення значення коефіцієнта парної кореляції об'єднаного масиву даних обумовлено різними значеннями швидкості старіння ізоляції вводів.

На рис. 2 наведено залежності показника ємності  $C_{10}$  від часу експлуатації для вводів трансформаторів Т2 підстанцій «Артема» Харківобленерго, «Сімферопольська», «Косіора».

Коефіцієнт кореляції для першого ряду дорівнює  $r = 0,653248$ , для другого ряду  $r = 0,478171$ , а для ряду 3  $r = 0,523738$ . У той же час коефіцієнт кореляції об'єднаного масиву  $r = 0,431542$ . З рис. 2 видно, що подібне зменшення коефіцієнта парної кореляції при об'єднанні трьох рядів в один масив обумовлено статистичною неоднорідністю.

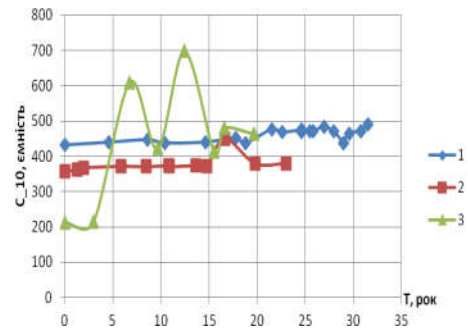


Рис. 2 – Залежність ємності ізоляції вводів від часу експлуатації 1 - ввід фази А трансформатора підстанції «Артема», 2 - ввід фази А трансформатора підстанції «Сімферопольська», 3 - ввід фази А трансформатора підстанції «Косіора»

Наведені приклади показують, що об'єднання неоднорідних тимчасових рядів в загальний масив даних призводить до різкого спотворення статистичних характеристик вибірки. При цьому основними причинами неоднорідності часових рядів показників якості ізоляції вводів є різні умови експлуатації.

Завдання формування статистично однорідних часових рядів показників якості ізоляції вводів зводиться до вибору часових послідовностей, для яких умови їх експлуатації збіглися. Зміна середніх значень, в нашому випадку показників якості ізоляції, відбувається під дією багатьох факторів, причому кількісний рівень впливу цих факторів невідомий, що значно ускладнює завдання формування статистично однорідних послідовностей. В таких умовах, коли не відомі ні кількісні рівні впливу факторів, ні вид функціональної залежності, найдоцільніше вирішувати зворотну задачу, тобто підбирати тимчасові ряди таким чином, щоб вони забезпечували мінімальний розкид щодо передбачуваної лінії тренда. Оскільки вид цієї лінії невідомий, необхідно підібрати таку статистичну характеристику, яка, з одного боку, дає інформацію про щільність стохастичною зв'язку між показником і часом експлуатації (тим самим забезпечує умову однорідності на всьому інтервалі спостереження показника) і в той же час не прив'язана до кривої певного виду. Такою характеристикою може бути вибіркоче кореляційне відношення [6]. Таким чином, завдання формування масиву статистично однорідних часових рядів зводиться до відшукування такої комбінації часових рядів показника, яка забезпечує максимальне значення кореляційного відношення на заданому часовому ін-

тервалі. Для формування груп введів з однаковою швидкістю дрейфу показників якості ізоляції використаний критерій максимуму емпіричного кореляційного відношення [4]. Для розрахунків використовувалась програма «KORREL» [10].

За результатами обробки інформації профілактичних випробувань ізоляції по кожному з показників якості ізоляції введів, які характеризують зміну її ізоляційних властивостей, складені підмножини однорідних даних, які визначили допустимі межі дрейфу параметрів [11]. Результати проведеного аналізу наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків

Показники якості ізоляції введів	Підмножини однорідних даних	Кореляційне відношення	
		$\eta_{yx}$	$\eta_{xy}$
$tg\delta_{10}$	M1	0,85	0,86
	M2	0,94	0,93
	M3	0,92	0,93
	M4	0,75	0,88
	M5	0,76	0,96
	M6	0,87	0,96
	M7	0,84	0,89
$tg\delta_3$	M1	0,81	0,79
	M2	0,82	0,64
	M3	0,77	0,93
	M4	0,81	0,66
$C_{10}$	M1	0,91	0,86
	M2	0,82	0,88
$C_3$	M1	0,92	0,84
	M2	0,79	0,75
	M3	0,92	0,86
	M4	0,89	0,70
$R_{10}$	M1	0,68	0,99
	M2	0,91	0,91

Результати дослідження стохастичною зв'язку між показниками діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу введів силових трансформаторів наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати дослідження стохастичною зв'язку між показниками діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції введів

Показники якості ізоляції введів	Значення коефіцієнта парної кореляції, нижньої і верхньої довірчого інтервалу, розрахункове значення T - критерію, кореляційне відношення					
	$r_{ii}$	$\rho$	$r_v$	$T_{наб}$	$\eta_{yx}$	$\eta_{xy}$
$tg\delta_1 - C_1$	0,03	0,11	0,19	2,76	0,87	0,61
$tg\delta_1 - tg\delta_3$	0,48	0,54	0,59	15,7	0,77	0,72
$tg\delta_1 - C_3$	-0,2	-0,08	0,01	1,9	0,79	0,57
$tg\delta_1 - R$	0,02	0,1	0,18	2,4	0,23	0,77
$C_1 - tg\delta_3$	0,09	0,17	0,24	4,1	0,6	0,81
$C_1 - C_3$	-0,2	-0,12	-0,04	3,1	0,84	0,88
$C_1 - R$	-0,3	-0,21	-0,13	5,3	0,28	0,9
$tg\delta_3 - C_3$	-0,2	-0,16	-0,08	4,0	0,85	0,58
$tg\delta_3 - R$	-0,2	-0,07	0,01	1,6	0,29	0,73
$C_3 - R$	-0,2	-0,05	0,03	1,1	0,29	0,87

Як видно з табл. 3, найбільш корельовано між собою виявилися показники, які характеризують діелектричні втрати основної ізоляції  $tg\delta_1$  та ізоляції зовнішніх шарів остова вводу щодо сполучної втулки  $tg\delta_3$ , ємність основної ізоляції  $C_1$  і опір основної ізоляції вводу  $R$ . У меншій мірі між собою корельовано  $tg\delta_3 - C_3$ . Не виявлено значущого зв'язку між  $tg\delta_1 - C_1$ ,  $tg\delta_1 - C_3$ ,  $tg\delta_1 - R$ . Слід також звернути увагу на відсутність значущого зв'язку між  $C_1 - C_3$ ,  $tg\delta_3 - R$ ,  $C_3 - R$ . Так як для цих показників  $\rho < \rho_{крит.}$ , то немає підстав вважати, що є тісний лінійний зв'язок між параметрами. Виявлено також практично повна відсутність зв'язку між  $tg\delta_3 - R$ ,  $C_3 - R$ . У табл. 3 також наведені результати розрахунку кореляційного відношення показників діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції введів силових трансформаторів. Оскільки  $\eta_{yx} \neq \eta_{xy}$ , то виконувався розрахунок як прямого  $\eta_{yx}$  так і зворотного  $\eta_{xy}$  значень кореляційних відношень. Слід зазначити, що найбільші значення кореляційних відношень виявлені між наступними парами показників:  $tg\delta_1 - C_1$ ;  $C_1 - tg\delta_3$ ;  $C_1 - C_3$ ;  $C_1 - R$ ;  $C_3 - R$ .

Отримані результати дозволяють оптимізувати математичні моделі прийняття рішень при оцінці стану високовольтних введів, за рахунок обліку наявності зв'язків між показниками діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції введів силових трансформаторів. Виявлені зв'язки дозволяють синтезувати оптимальні математичні моделі для прогнозування значень показників діелектричних характеристик введів силових трансформаторів, а, отже, і їх залишкового ресурсу.

Результати дисперсійного аналізу для оцінки відхилення від лінійності наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Дисперсійний аналіз оцінки відхилення від лінійності

Назва показника	Масиви даних	k	N	F-статистика	
				Fроз	Fкрит
Тангенс діелектричних втрат $tg\delta_3$	M1	9	247	11	2,28
	M2	9	225	18	2,28
	M3	3	81	77	5,24
	M4	3	73	39	5,26
Тангенс діелектричних втрат ізоляції $tg\delta_{10}$	M1	7	121	23	2,68
	M2	5	73	4,5	3,33
	M3	5	67	3,8	3,33
	M4	7	141	121	2,56
	M5	6	102	28	2,57
	M6	5	69	23	3,33
	M7	5	57	12	3,39
Ємність вимірювального конденсатора $C_3$	M1	8	197	201	2,41
	M2	5	153	61	3,12
	M3	3	99	221	5,21
	M4	5	132	110	3,12
Ємність основної ізоляції вводу $C_{10}$	M1	3	18	10	6,2
	M2	8	476	140	2,41
	M3	5	123	192	3,23

Як впливає з табл. 4, для всіх масивів однорідних даних гіпотеза про лінійність була відкинута,

оскільки розрахункові значення F-статистик значимо перевищували критичні.

**Висновки.** Отримані результати дозволяють зробити ряд наступних висновків: – на спостережуваних інтервалах експлуатації швидкість дрейфу значень показників змінюється, при цьому на залежностях показників від часу експлуатації можна виділити характерні ділянки, що відповідають певним стадіям процесу старіння;

– через відхилення від лінійності залежностей показників якості ізоляції вводів від часу експлуатації накладається ряд істотних обмежень на вибір моделі факторного аналізу;

– виявлені відхилення від лінійності значно ускладнюють як моделі для оцінки ступеня старіння ізоляції високовольтних вводів, так і моделі для прогнозу залишкового ресурсу;

– однією з найважливіших задач наступного етапу досліджень є кількісна оцінка впливу умов експлуатації на швидкість старіння ізоляції вводів.

**Список літератури:** 1. E. Gulski, J. Smith, R. Schomber, J. Slangen, P.Schicarski. Condition Assessment Model for Power Transformers /Proc. 14th ISH, Beijing, 2005. Paper F-07. 2. Жорняк Л.Б. Повышение надежности и эффективности высоковольтных вводов / Л.Б. Жорняк, Е.Ю. Райкова, В.И. Осинская // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Електротехніка і електроенергетика. – 2008. – №4. – С. 94-99. 3. Норми випробування електрообладнання. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – К.: ОЕП ГРІФРЕ. 2009. – 232 с. 4. Живодерников С.В. Мониторинг состояния маслонаполненных вводов под рабочим напряжением / С.В. Живодерников, В.А. Русов, В.И. Козлов // В сб. Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 28 / Под ред. А.И. Таджикибаева, В.Н. Осотова. – СПб: ПЭИПК, 2005. – С. 379-395. 5. Кассихин С. Д. Оценка эффективности и целесообразности диагностики высоковольтных вводов на основе опыта эксплуатации / С.Д. Кассихин, К.Г. Сипилкин, А.З. Славинский [и др.] // Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт, продление срока службы: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Виктора Соколова/под ред. А. Г. Овсянникова, В. Н. Осотова. – Екатеринбург: Издательский дом «Автограф». 2010. – 232 с. 6. Аникеева М.А. Диагностические признаки для отбраковки вводов высокого напряжения с бумажно-масляной изоляцией / М.А. Аникеева, Р.С. Арбузов, С.В. Живодерников [и др.] // Электро.– 2009.–№ 1. – С. 32-35. 7. Бондаренко В.Е. Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел / В.Е. Бондаренко, П.Ф. Шапов, О. В. Шутенко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 452 с. 8. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. / Н. Джонсон, Ф. Лион Перев. с англ. Э. К. Лецкого. – М.: Мир, 1980. – 610 с. 9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – 7-е изд., стер., М.: Высшая школа, 2000.– 480 с. – ISBN 5-06-003464-X. 10. Шутенко О.В. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных / О.В. Шутенко, Д.Н. Баклай, – Х.: НТУ «ХПИ». 2012. –268 с.– ISBN 978-617-05-0059-5. 11.

Загайнова А.А. Формирование статистически однородных временных рядов показателей качества изоляции конденсаторного типа высоковольтных вводов / А.А. Загайнова // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання.–Кременчук: КрНУ. 2015–вып.1/2015(3). – С. 201-203.

**References:** 1. E. Gulski, J. Smith, R. Schomber, J. Slangen, P.Schicarski. (2005) Condition Assessment Model for Power Transformers /Proc. 14th ISH, Beijing. Paper F-07. 2. Zhornyak L., Raikov E., Osinskaya V. (2008) Improving the reliability and efficiency of high-voltage inputs [Povysheniye nadezhnosti i effektivnosti vysokovol'tnykh vvodov]. Bulletin KSPU Mykhailo Ostrohradskiy. Electrical engineering and power generation. No. 4. P. 94-99. 3. Standards testing of electrical equipment. SOU-N 20,304 EE: 2009. [Normy vyprobuvannya elektroobladnannya. SOU-N EE 20.302:2007]. – Kiev. GRIFRE. 2009.– 232 p. 4. Zhivodernikov S.V., Rusov, V.A., Kozlov V.I. (2005) Monitoring of oil-filled inputs with the working voltage. [Monytorynh sostoyaniya maslonapolnennykh vvodov pod rabochym napryazheniem.]. In compilation Methods and tools for assessment of the energy equipment. Vol. 28 St. Petersburg: PEIPK, — p. 379-395. 5. Kassikhin S.D., Sipilkin K.G, Slavinskiy A.Z., Ustinov V.N., Pintal S., Vereshchagin M.B. (2010) Assessment of the effectiveness and appropriateness of the diagnosis of high-voltage inputs on the basis of operating experience. [Otsenka éffektivnosti y tselesoobraznosti dyahnostyky vysokovol'tnykh vvodov na osnove opyta ékspluatatsyy]. Transformers: maintenance, diagnosis and repair of the life extension: International scientific-practical conference dedicated to seventieth Victor Sokolov. ed. Ovsyannikov A.G., V.N. Osotova. Ekaterinburg. Publishing house "Autograph". 232 p. 6. Anikeeva M.A., Arbuzov R.S., Zhivodernikov S.V., Lazarev E.A., Ovsyannikov A.G., Panov M.A. (2009) Diagnostic features to reject a high voltage input with paper-oil insulation . [Diagnosticheskiye priznaki dlya otbrakovki vvodov vysokogo napryazheniya s bumazhno-maslyanoy izolyatsiyey]. ELECTRIC. No. 1. P.12-15. 7. Bondarenko, V. E., Shchapov, P. F., Shutenko, O. V. (2007) "Improved operational control of the measuring transformer oils", Povysheniye effektivnosti ekspluatatsionnogo izmeritel'nogo kontrolya transformatornykh masel, Kharkov, NTU "KPI", Ukraine. 8. Dzhonson N., and Lion F. (1980) Statistika i planirovaniye eksperimenta v tekhnike i nauke. Metody obrabotki dannykh . [Statistics and experimental design in Enginerring and the physical Siences] Translated by Letskogo E.K., Mir, Moscow, Russia. 9. Gmurman V.E. (2000) Probability theory and mathematical statistics. [Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika]. 7th ed., Sr., M.: Higher School. 479 p. ISBN 5-06-003464-X. 10. Shutenko O.V. Baklaj D.N. (2012) Planning of experimental studies in the power sector. The methods of experimental data processing.[Planirovaniye eksperimental'nykh issledovaniy v elektroenergetike. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh]. Kharkov: NTU "KPI". 268 p. ISBN 978-617-05-0059-5. 11. Zagaynova A.A. (2015) Formation of statistically homogeneous time series of indicators of quality of isolation condenser type high-voltage inputs. [Formirovaniye statisticheskiy odnorodnykh vremennykh ryadov pokazateley kachestva izolyatsii kondensatornogo tipa vysokovol'tnykh vvodov]. Problems of energy saving in electrotechnical systems. Science, Osvita i practice. Kremenchuk. – No. 1. P. 201-203.

Надійшла (received) 11.02.17

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Аналіз змін показників якості ізоляції високовольтних вводів протягом тривалої експлуатації / О. А. Загайнова, Г. М. Сердюкова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017.– № 31 (1253). – С. 40 – 45. Бібліогр.: 11 назв. – ISSN .**

**Анализ изменений показателей качества изоляции высоковольтных вводов в течение длительной эксплуатации / А. А. Загайнова, Г. Н. Сердюкова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017.– № 31 (1253). – С. 40 – 45. Бібліогр.: 11 назв. – ISSN.**

**Analysis of changes in insulation quality indicators of high-voltage bushings of during long-term operation / A. A. Zagaynova, G. N. Serdyukova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1253). – P. 40 – 45. Bibliogr.: 11. – ISSN.**

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

**Загайнова Олександра Анатоліївна** – асистент кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.:707-69-79;e-mail: zagaynova@gmail.com

**Zagaynova Aleksandra Anatoliyivna**, assistant of the Department of electric power transmission. National technical university «Kharkiv polytechnic institute», tel.:707-69-79; e-mail:zagaynova@gmail.com

**Сердюкова Галина Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії. тел. : 707-69-79; e-mail: serdukova.galina@gmail.com

**Serdyukova Galina Mykolayivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of electric power transmission, tel.:707-69-79; e-mail:serdukova.galina@gmail.com...

УДК 621.311

**О.П. ЛАЗУРЕНКО, М.М. КРУГОЛ, А. В. ИВАХНОВ****МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ГРУПИ МЕРЕЖЕВИХ НАСОСІВ ПРИ РОБОТІ ТЕЦ ПО ТЕПЛОМУ ГРАФІКУ НАВАНТАЖЕННЯ В ЛІТНІЙ ПЕРІОД**

В даній статті приводяться результати моделювання режиму роботи групи мережеских насосів ТЕЦ, що працює за тепловим графіком навантаження в літній період. Частка встановленої потужності даних механізмів в структурі власних потреб ТЕЦ досить висока, тому є важливим впровадження енергоефективних технологій при їх експлуатації. В даній статті приводяться результати моделювання групи мережеских насосів в порівнянні з фактичними даними про режим роботи устаткування власних потреб ТЕЦ.

**Ключові слова:** ТЕЦ, механізми власних потреб, мережескі насоси, асинхронний двигун, режим роботи, продуктивність насосів

В данной статье приводятся результаты моделирования режима работы группы сетевых насосов ТЭЦ, которая работает по тепловому графику нагрузки в летний период. Часть установленной мощности этих механизмов в структуре собственных нужд ТЭЦ достаточно высокая, поэтому очень важным является внедрение энергоэффективных технологий при их эксплуатации. В данной статье приводятся результаты моделирования сетевых насосов в сравнении с фактическими данными о режиме работы оборудования собственных нужд ТЭЦ.

**Ключевые слова:** ТЭЦ, механизмы собственных нужд, сетевые насосы, асинхронный двигатель, режим работы, производительность насоса

This article presents a mathematical model of CHPP line pump and results of the pump mode simulation. The pump consumption is equal to 35 % of CHPP auxiliary consumption, which is inefficient and needs improving. High-power induction motors are used to drive the pumps. To advance the pump efficiency, it is necessary to enhance the motors characteristics through optimization of the pump rotation speed. A mathematical model in  $\alpha, \beta, 0$  – coordinates is accepted for the induction motors simulation. The simulation results are verified with Kharkiv CHPP#3 line pump behavior data for the 2013 summer operation. CHPP#3 is equipped with 14 line pumps with productivity of 1000 m<sup>3</sup>/hour each. Their characteristics are described with a 3<sup>rd</sup> degree polynomial expression in power – productivity – speed coordinates. The polynomial coefficients have been determined through on-site testing. The simulations are carried out in MatLab. CHPP generators output depends on the line water volume circulating through the CHPP heat transfer station and the water temperature. The number of working pumps and their productivity depend on the line water volume too. With application of the data obtained from Kharkiv CHPP #3, electric and heat generation graphs are built to simulate the line pumps modes. Comparison of the simulation results with the actual data shows simulation error below 5%.

**Key words:** CHPP, auxiliary, line pumps, induction motor, mode, pump's productivity

**Постановка задачі.** Моделювання механізмів власних потреб є дуже важливою задачею при аналізі енергоспоживання на власні потреби станції, аналізі аварійних процесів, вибігу устаткування та режимів самозапуску електричної станції. Основними споживачами електричної енергії на електричних станціях є асинхронні двигуни – приводи устаткування власних потреб електричних станцій.

Серед них, найпотужнішими споживачами електричної енергії є живильні насоси, димососи, вентилятори гарячого дуття, циркуляційні насоси, шарові млини. На ТЕЦ також встановлені мережескі насоси.

В структурі встановленої потужності механізмів власних потреб потужність даних механізмів досягає 30%, тому ефективність використання електричної енергії в значній мірі залежить від їх режиму роботи. Ці насоси характеризуються тим, що мають достатньо високий коефіцієнт завантаження (на рівні 0,8-0,9) і працюють в тривалому режимі роботи. Для приводу даних механізмів використовуються здебільшого асинхронні двигуни напругою 6 кВ потужністю 400-1600 кВт.

Мережескі насоси призначені для подачі води із трубопроводів зворотної води на мережескі підігрівачі або водогрійні котли. На деяких ТЕЦ встановлюються мережескі насоси I та II підйому [1]. В статті [2] показана класифікація устаткування власних потреб ТЕС, за якою мережескі насоси включені в групу устаткування власних потреб ТЕС, режим

роботи яких залежить від режиму роботи теплових мереж. В даній статті розглядається режим роботи устаткування

групи мережеских насосів на прикладі Харківської ТЕЦ-3.

Авторами досліджується проблема групового регулювання продуктивності механізмів власних потреб ТЕЦ, що працює за тепловим графіком навантаження в літній період [3, 4].

Оскільки значна кількість електричної енергії, що споживається на власні потреби ТЕЦ, припадає саме на мережескі насоси (до 35% [2]), гостро стає питання розробки заходів з енергозбереження при експлуатації даних механізмів.

При розробці таких заходів необхідно показати їх ефективність. Одним із способів визначення ефективності впроваджених заходів з енергозбереження є математичне моделювання механізмів та режимів їх роботи.

**Аналіз літератури.** Про моделюванні механізмів власних потреб необхідно вирішити дві задачі: моделювання асинхронного двигуна, що використовується для їх приводу та моделювання самого механізму власних потреб.

Дослідженням питання моделювання асинхронних двигунів займалися серед інших такі видатні вчені, як Г. Сіпайлов, Я. Ойрех, В. Сивокобиленко, Ю. Веприк та ін. Так математичні моделі асинхронних двигунів можна знайти в [5, 6, 7]. Використання

математичних моделей АД при аналізі перехідних процесів в системі електропостачання власних потреб ТЕС можна знайти в [8, 9].

Проблемою при моделюванні асинхронних двигунів є визначення параметрів їх схеми заміщення. Цим питанням також займається багато вчених. При

пошуку інформації для вихідних даних для моделювання не завжди можна отримати технічні характеристики двигунів. Здебільшого доступні лише паспортні значення основних величин, такі як потужність, номінальна напруга та струм, швидкість обертання, коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності двигуна. З каталожних даних також можна отримати такі величини, як відношення пускового струму до номінального, відношення пускового та критичного моменту, момент інерції ротора двигуна. По цим даним за методиками, що пропонуються в [8, 9, 10, 11] можна розрахувати параметри схеми заміщення асинхронного двигуна, що моделюється.

Вирішенням задачі моделювання механізму власних потреб займалися такі вчені, як Г. Онищенко, Л. Ріхтер, Б. Лезнов, В.Георгіаді, В. Костишин. Моделі механізмів власних потреб, а це в основному відцентрові насоси, можна знайти в [12, 13, 14, 15, 16].

**Моделювання асинхронних двигунів.** При моделюванні симетричних асинхронних машин найбільш раціонально використовувати математичну модель асинхронного двигуна в системі координат  $\alpha, \beta, 0$ . При розгляді рівнянь, що описують режим роботи асинхронної машини в цих координатах отримаємо результуючу систему рівнянь (1) [13].

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \\ u_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \\ 0 = r_r i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega \psi_{r\beta} \\ 0 = r_r i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \omega \psi_{r\alpha} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{\omega} \left( \frac{3}{2} p L_m (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) - M_c \right) \\ \psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \\ \psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \\ \psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} \\ \psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $p$  – кількість пар полюсів;  
 $J$  – момент інерції ротора;  
 $M_{об}$  – обертаючий момент двигуна;  
 $M_c$  – статичний момент опору;  
 $i$  – струми;  
 $r$  – активні опори обмоток;  
 $L$  – індуктивності обмоток;

$\Psi$  – потокощеплення.

З урахуванням системи базисних одиниць, система (1) прийме вигляд (2) [13].

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{s\alpha} = \frac{r_s x_r}{x_s x_r - x_m^2} \left( \psi_{s\alpha} - \frac{x_m}{x_r} \psi_{r\alpha} \right) + \frac{1}{\omega_6} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \\ u_{s\beta} = \frac{r_s x_r}{x_s x_r - x_m^2} \left( \psi_{s\beta} - \frac{x_m}{x_r} \psi_{r\beta} \right) + \frac{1}{\omega_6} \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \\ 0 = -\frac{r_r x_s}{x_s x_r - x_m^2} \left( \frac{x_m}{x_s} \psi_{s\alpha} - \psi_{r\alpha} \right) + \frac{1}{\omega_6} \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega \psi_{r\beta} \\ 0 = -\frac{r_r x_s}{x_s x_r - x_m^2} \left( \frac{x_m}{x_s} \psi_{s\beta} - \psi_{r\beta} \right) + \frac{1}{\omega_6} \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \omega \psi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad (2)$$

Параметри схеми заміщення асинхронних двигунів розраховуються за методиками, що представлені в [9, 13, 17]. Дані методики основані на розрахунку параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна на основі його паспортних даних (кратності пускового струму, максимального і пускового моментів, номінальних значень активної потужності, напруги, струму статора, коефіцієнтів потужності та корисної дії, швидкості обертання).

На Харківській ТЕЦ-3 встановлено 14 мережевих насосів типу 10 НМКх2. Для приводу даних насосів використовуються асинхронні двигуни типу А-400У-4У3 номінальною потужністю 630 кВт. Паспортні дані двигуна представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Паспортні дані асинхронного двигуна типу А-400У-4У3

Тип	P, кВт	U, кВ	I, А	cosφ	КПД	m <sub>m</sub>	m <sub>n</sub>	i <sub>n</sub>
А-400У-4У3	630	600 0	73	0,88	0,951	2, 6	1	6,4

При використанні методики розрахунків параметрів схеми заміщення за каталожними даними, були отримані залежності активного та індуктивного опорів обмотки ротору, що приведені до статорної обмотки, активного та індуктивного опорів статорної обмотки та опору взаємної індукції обмоток від ковзання двигуна. Результати розрахунків у вигляді графіків цих залежностей представлені на рис. 1.

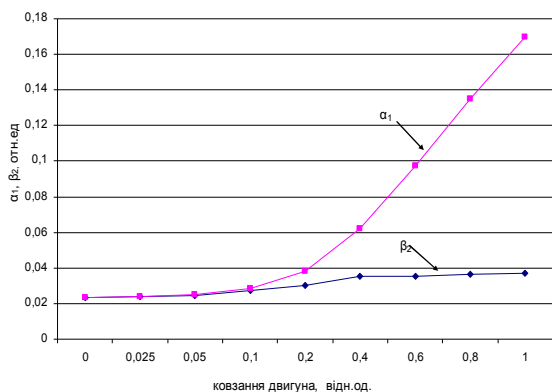


Рис. 1 Залежність параметрів асинхронного двигуна типу А-400У-4У3 від ковзання

Осцилограма струму в фазі пуску асинхронного двигуна, та швидкості обертання ротора двигуна, що були отримані при моделюванні, представлені на рис. 2-3.

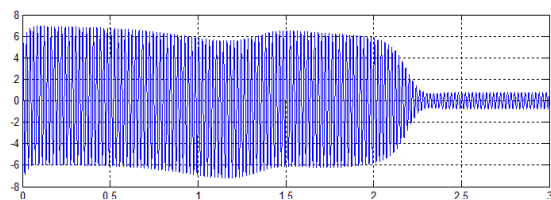


Рис. 2 – Осцилограма струму у фазі А асинхронного двигуна типу А-400У-4У32 при його пуску

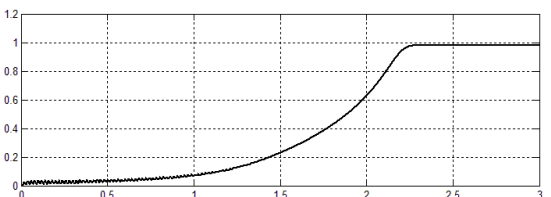


Рис. 3 – Осцилограма зміни швидкості обертання при пуску асинхронного двигуна типу А-400У-4У32

**Моделювання мережевих насосів.** При моделюванні режиму роботи мережевого насосу необхідно побудувати його робочі характеристики. При цьому робочі характеристики відцентрових механізмів, якими і є мережеві насоси типу 10НМКх2, в робочій зоні зміни подачі з достатньою точністю в загальному вигляді апроксимуються тричленом 3 ступеня [12, 15]. Також, найбільш важливими параметрами є їх продуктивність та швидкість обертання робочого колеса і напір води, який вони створюють.

Потужність, що споживається асинхронним двигуном для розвитку необхідного моменту на валу мережевого насоса, та напір, що створюється ним можна представити наступними виразами [12, 15]:

$$P_{\text{мех}} = A_3 n^2 Q - B_3 n Q^2 + D_3 n^3 \quad (3)$$

$$H = A_2 n^2 + B_2 n Q + C_2 Q^2 \quad (4)$$

де  $n$  – швидкість обертання механізму, об/хв.;

$Q$  – продуктивність механізму, м<sup>3</sup>/год;

Коефіцієнти  $A_2, B_2, C_2, A_3, B_3, D_3$  розраховуються з експериментальних даних, а саме з урахуванням значень напору та споживаної потужності при закритій засувці, при частинному навантаженні та номінальному навантаженні [12].

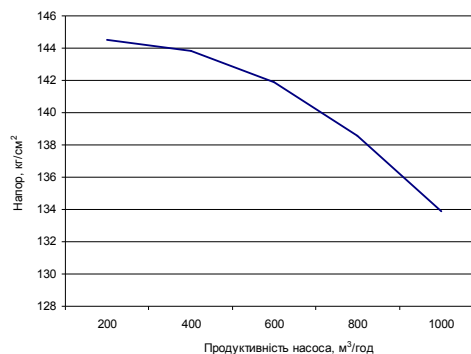


Рис. 4 – Залежність напору від продуктивності насоса 10НМКх2, яка отримана при моделюванні

За отриманими експериментальними даними були отримані коефіцієнти для моделювання режиму роботи мережевих насосів типу 10НМКх2, які представлені в табл.2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти, що використовуються при моделюванні режиму роботи мережевого насоса типу 10 НМКх2

Тип насосу	$A_3$	$B_3$	$D_3$
10 НМКх2	$154,84 \cdot 10^{-9}$	$-30,97 \cdot 10^{-9}$	$38,56 \cdot 10^{-9}$

Отримана робоча характеристика мережевого насоса представлена на рис.4, 5

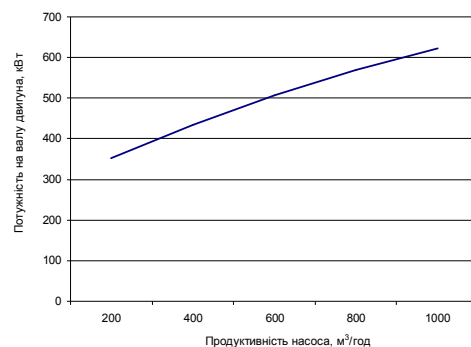


Рис. 5- Залежність потужності на валу двигуна від продуктивності насоса 10НМКх2, яка отримана при моделюванні

**Робота ТЕЦ за тепловим графіком навантаження в літній період.** Як показано в [4, 5] теплофікаційні ТЕЦ в літній період працюють за тепловим графіком навантаження, тобто електрична потужність на валу генератора залежить від теплового режиму роботи станції. Це зумовлено використанням теплофікаційних турбін та турбін з протитиском. В конденсатор теплофікаційних турбін подається зворотна вода з трубопроводів зворотної води теплових мереж. Якщо використовуються турбіни з



протитиском, то зворотна вода подається в мережеві підігрівачі (бойлери). Потужність на валу турбогенератора залежить від кількості циркуляційної води та її температури.

Кількість мережевої води залежить від періоду року та кількості споживачів теплової енергії. В свою чергу, від кількості води залежить кількість працюючих мережевих насосів та їх режим роботи.

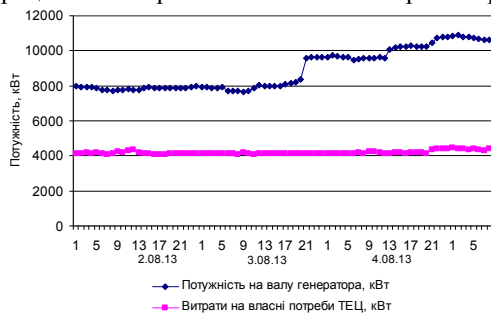


Рис. 6 – Потужність на валу генератора та витрати на власні потреби ТЕЦ в літній період Харківська ТЕЦ-3 знаходиться в центральній частині м. Харкова. В зимовий період несе до 25% теплового навантаження м. Харкова, в літній період – до 40%.

Розглянемо режим роботи даної станції за 2-5 серпня 2013р. Електричне навантаження станції та витрати на власні потреби показано на рис. 6.

Досить значна частка споживання електричної енергії на власні потреби зумовлена великою часткою у встановленій потужності механізмів власних потреб, а саме мережевих насосів, що мають досить значну потужність та споживання електричної енергії. Другою причиною є застарілі неефективні способи регулювання продуктивності механізмів власних потреб.

Значний ріст виробітку електричної енергії 3 серпня о 18 годині зумовлений підключенням теплового району до ТРП ТЕЦ, тобто збільшенням об'єму циркуляції мережевої води через ТРП ТЕЦ. Об'єм циркуляції мережевої води через ТРП ТЕЦ і її температура показані на рис. 7-8.

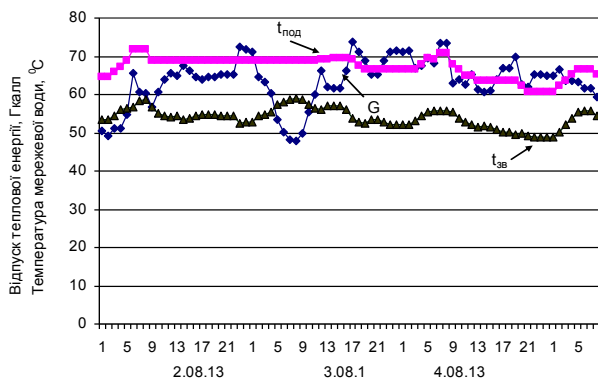


Рис. 7 – Відпуск теплової енергії та температура мережевої води в літній період

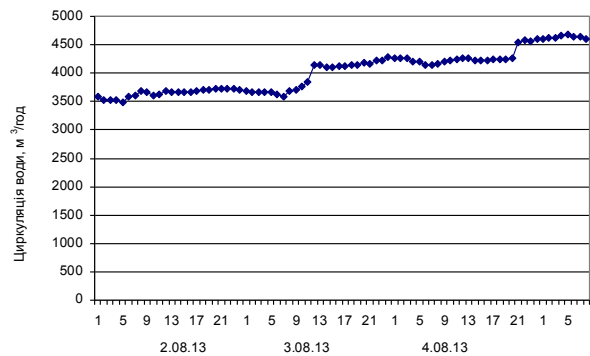


Рис. 8 – Циркуляція мережевої води через ТРП ТЕЦ

О 10 годині почалося підключення теплового району, що зумовило поступове збільшення циркуляції мережевої води. Об 11 годині продуктивності 3 насосів не вистачало, тому був запущений четвертий мережевий насос. Продуктивність мережевих насосів ТЕЦ показана на рис. 9.

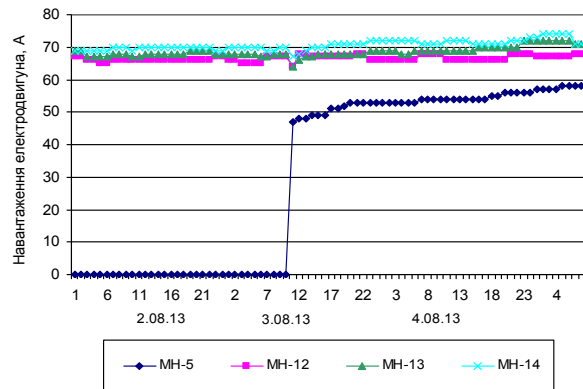


Рис. 9 – Продуктивність мережевих насосів ТЕЦ

Моделювання режиму роботи мережевих насосів ТЕЦ виконувалося з застосуванням математичних виразів (1 – 4). При моделюванні були прийняті наступні допущення:

- живлення асинхронних двигунів ведеться від системи безкінечної потужності з постійною напругою та частотою;
- не враховувалася додаткове живлення теплових мереж в об'ємі циркуляції мережевої води;
- не враховувалася різний гідравлічний опір трубопроводів, що ведуть до живильних насосів.
- були прийняті однакові умови щодо режиму роботи мережевих насосів.

Результати моделювання у вигляді величин струмів, що споживаються асинхронними двигунами порівнювались з фактичним струмом споживання асинхронних двигунів, що були отримані за оперативними відомостями режиму роботи устаткування турбінного цеху ТЕЦ.

Порівняння фактичних струмів зі струмами, що були одержані при моделюванні показано на рис. 10-13.

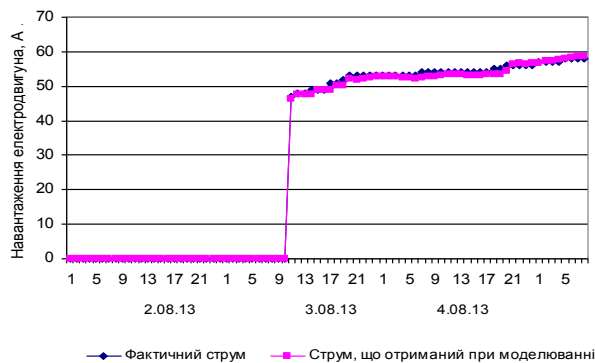


Рис. 10 – Порівняння фактичного струму зі струмом, що отриманий при моделюванні для мережевого насосу №5

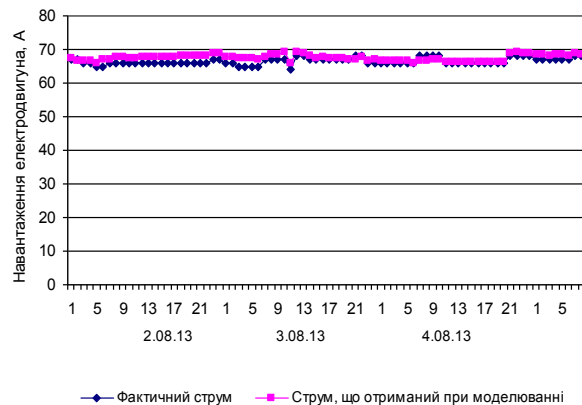


Рис.11 – Порівняння фактичного струму зі струмом, що отриманий при моделюванні для мережевого насосу №12

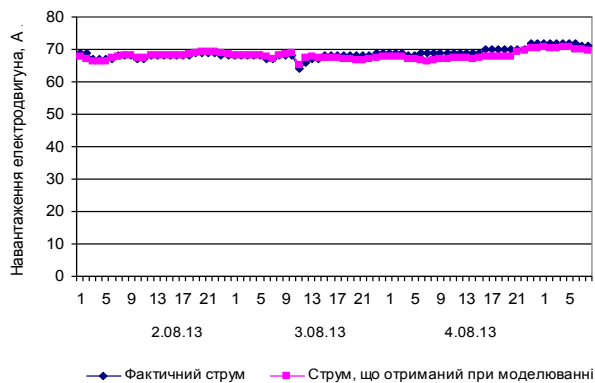


Рис.12 – Порівняння фактичного струму зі струмом, що отриманий при моделюванні для мережевого насосу №13

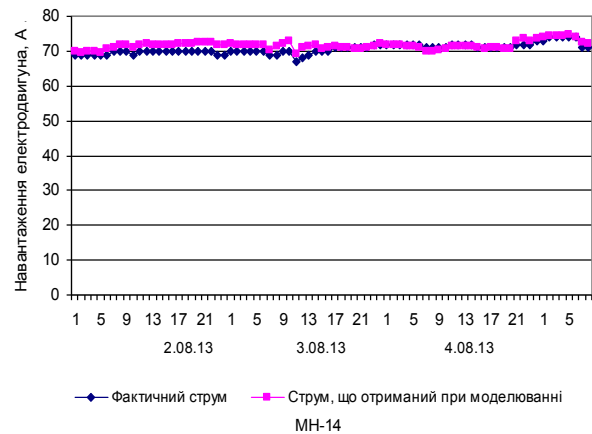


Рис. 13 – Порівняння фактичного струму зі струмом, що отриманий при моделюванні для мережевого насосу №14

Оцінка точності моделювання проводилася на основі розрахунку відносної похибки:

$$\delta_{MH} = \frac{I_{фак} - I_{мод}}{I_{фак}} 100\% \quad (5)$$

Отримані відносні похибки показані на графіку, що представлений на рис. 14.

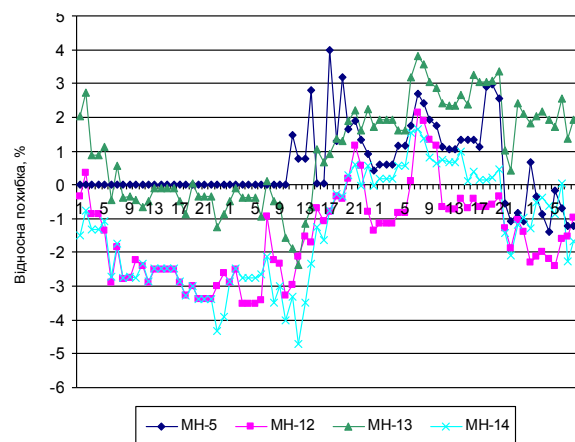


Рис. 14 – Відносна похибка моделювання режиму роботи мережевих насосів

Точність моделювання є достатньо висока, відхилення більше 3% можна пояснити неточністю виміру фактичного струму, що споживається електричним двигуном.

**Висновки.** В даній статті були представлені результати моделювання режиму роботи групи мережевих насосів та доведена доцільність використання математичних моделей (1-4) при моделюванні цих механізмів. Точність моделювання на рівні 3% є досить добрим результатом і данні моделі можуть використовуватися в подальшому аналізі та удосконаленні режимів роботи устаткування влас-

них потреб ТЕЦ та аналізі заходів щодо підвищення його енергоефективності.

**Список літератури. 1.** Вороновский Г.К. Современная тепловая электростанция (теплотехническое оборудование и экология) / Г.К. Вороновский, В.Н. Стенников. – Х.: Курсор, 2000. – 178с. **2.** Лазуренко О.П. Новый підхід до класифікації електроустаткування власних потреб теплових електричних станцій / О.П. Лазуренко, М.М. Кругол // Електротехніка і електромеханіка. Спеціальний випуск. Том 1. Силова електроніка та енергоефективна електроенергетика. – 2016. – № 4(1) – С. 43-47. **3.** Лазуренко А.П. Работа ТЕЦ по тепловому графику нагрузки в летний период / А.П. Лазуренко, Н.М. Кругол // Вісник НТУ «ХП». Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2013. – № 59(1032). – С. 79–83. **4.** Лазуренко А.П. Использование группового регулирования механизмами собственных нужд ТЭЦ для повышения КПД в летний период / А.П. Лазуренко, Н.М. Кругол // Вісник НТУ «ХП». Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2014. – № 56(1098). – С. 78–82. **5.** Сипайлов Г.А. Математическое моделирование электрических машин. / Г.А. Сипайлов, А.В.Лаос. – М. : Высшая школа, 1980. – 176 с **6.** Веприк Ю.Н. Компьютерное моделирование режимов работы электрических сетей / Ю.Н. Веприк. – Х. : НТУ «ХПИ», 2015. – 304 с. **7.** Пустоветов М. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов / М. Пустоветов, К.Солтус, И. Синявский. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 208 с **8.** Ойрех Я.А. Режимы самозапуска асинхронных электродвигателей / Я.А. Ойрех, В.Ф. Сивокобыленко. – М. : Энергия, 1974. – 96с. **9.** Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2002. – 136 с. **10.** Makeev M.S.. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М.С. Makeev, А.С. Кувшинов. // Вектор науки ТГУ. – 2013. – № 1(23). – С. 108-112. **11.** Свит П.П. Определение параметров схемы замещения двигателей небольшой мощности / П.П.Свит, Б.В. Семкин // Ползуновский альманах. – 2004. – № 3. – С. 96-99. **12.** Онищенко Г.Б. Электропривод турбомеханизмов/ Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков. – М. : Энергия, 1972. – 240с. **13.** Вязунов Е.В. Аналитическое представление характеристик центробежных насосов при переменной частоте вращения / Е.В. Вязунов, С.В. Путин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 4(8) – С. 67-69. **14.** Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок/ Б.С. Лезнов. – М. : Машиностроение, 2013. – 176с. **15.** Георгиади В.Х. Поведение энергоблоков ТЭС при перерывах электроснабжения собственных нужд (часть 1) / В.Х. Георгиади, – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. – 80с. **16.** Костишин В. Моделирование режимов работы відцентрових насосів на основі електрогідравлічної аналогії/ В. Костишин – Івано-Франківськ: Факел, 200. – 163с **17.** Сивокобыленко В.Ф. Параметры и схемы замещения асинхронных двигателей с вытеснением тока в роторе/ В.Ф. Сивокобыленко, В.А. Павлюков// Электрические станции. – 1976. – № 2.

**References:** 1. Voronovskij G.K. Sovremennaja teplovaja elektrostancija (teplotehničeskoe oborudovanie i ekologija) [Modern Thermal Power Plant (power equipment and ecology)] / G.K. Voronovskij, V.N. Stennikov. – H.: Kursor, 2000. – 178s. **2.** Lazurenko O.P. Novij pidhid do klasifikacii elektroustatkuvannja vlasnih potreb teplovih elektrichnih stancij [A new approach to the classification of auxiliaries thermal power plant mechanisms] / O.P.

Lazurenko, M.M. Krugol // Elektrotehnika i elektromehanika. Special'nij vipusk. Tom 1. Silova elektronika ta energoefektivna elektroenergetika. – 2016. – № 4(1) – S. 43-47. **3.** Lazurenko A.P. Rabota TES po teplovomu grafiku nagruzki v letnij period [THPP work on head load chart in summer] / A.P. Lazurenko, N.M. Krugol // Visnik NTU «HPI». Ser.: Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist'. – 2013. – № 59(1032). – S. 79–83. **4.** Lazurenko A.P. Ispol'zovanie gruppovogo regulirovanija mehanizmami sobstvennyh nuзд TEC dlja povyshenija KPD v letnij period [The use of the group mechanisms control of ThPP auxiliaries for increasing of efficiency in summer] / A.P. Lazurenko, N.M. Krugol // Visnik NTU «HPI». Ser.: Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist'. – 2014. – № 56(1098). – S. 78–82. **5.** Sipajlov G.A. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Power machine simulations analyzis] / G.A. Sipajlov, A.V.Laos. – M. : Vysshaja shkola, 1980. – 176 s **6.** Veprik Ju.N. Komp'juternoe modelirovanie rezhimov raboty elektricheskikh setey [Power networks operations computer modeling] / Ju.N. Veprik. – H. :

NTU «HPI», 2015. – 304 s. **7.** Pustovetov M. Komp'juternoe modelirovanie asinhronnyh dvigatelej i transformatorov [Computer modeling of induction motors and transformer] / M. Pustovetov, K.Soltus, I. Sinjavskij. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 208 s **8.** Ojreh Ja.A. Rezhimy samozapuska asinhronnyh elektrodvigatelej [Self-starting mode of induction motors] / Ja.A. Ojreh, V.F. Sivokobylenko. – M. : Energija, 1974. – 96s. **9.** Sivokobylenko V.F. Perekhodnye processy v sistemah elektro-snabzhenija sobstvennyh nuзд elektrostancij [transient projects in auxiliaries of power plant]/ V.F. Sivokobylenko, V.K. Lebedev. – Doneck: RVA DonNTU, 2002. – 136 s. **10.** Makeev M.S.. Algoritm rasčeta parametrov shemy zameshhenija asinhronnogo dvigatelja po katalozhnyh dannym [The algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of the induction motor on the catalog data] / M.S. Makeev, A.S. Kuvshinov. // Vektor nauki TGU. – 2013. – № 1(23). – S. 108-112. **11.** Svit P.P. Opredelenie parametrov shemy zameshhenija dvigatelej nebol'shoj moshhnosti [Defining the parameters of equivalent circuits of small power motors] / P.P.Svit, B.V. Semkin // Polzunovskij al'manah. – 2004. – № 3. – S. 96-99. **12.** Onishhenko G.B. Jelektroprivod turbomehanizmov [fluid-handling application motor driven] / G.B. Onishhenko, M.G. Jun'kov. – M. : Jenergija, 1972. – 240s. **13.** Vjazunov E.V. Analiticheskoe predstavlenie harakteristik centrbeznyh nasosov pri peremnoj chaste vrashhenija [Analytical representation of the characteristics of centrifugal pumps with variable speed] / E.V. Vjazunov, S.V. Putin // Nauka i tehnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov. – 2012. – № 4(8) – S. 67-69. **14.** Leznov B.S. Chastotno-reguliruemyj elektroprivod nasosnyh ustanovok [Variable frequency drives pump installations] / B.S. Leznov. – M. : Mashinostroenie, 2013. – 176s. **15.** Georgiadi V.H. Povedenie energoblokov TES pri pereryvah jelektrosnabzhenija sobstvennyh nuзд (chast' 1) [Behavior CHP units at intervals electricity their own needs. Part 1] / V.H. Georgiadi, – M.: NTF «Jenergoprogress», 2013. – 80s. **16.** Kostishin V. Modeljvannja rezhimiv roboti vidcentrovih nasosiv na osnovi elektrogidravlichnoj analogi [Simulation modes of centrifugal pumps based on electrohydraulic analogy] / V. Kostishin – Ivano-Frankivs'k: Fasel, 200. – 163s **17.** Sivokobylenko V.F. Parametry i shemy zameshhenija asinhronnyh dvigatelej s vytesneniem toka v rotore [The parameters and equivalent circuit of asynchonous motors with the current displacement in the rotor] / V.F. Sivokobylenko, V.A. Pavljukov// Jelekticheskie stancii. – 1976. – № 2.

Надійшла (received) 07.02.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Моделирование режима работы группы сетевых насосов при работе ТЭЦ по тепловому графику навантаження в літній період / О.П. Лазуренко, М.М. Кругол // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017.– № 31 (1253). – С. 46 – 52. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Моделирование режима работы группы сетевых насосов при работе ТЭЦ по тепловому графику нагрузки в летний период / А.П. Лазуренко, М.М. Кругол // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017.– № 31 (1253). – С. 46 – 52. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Simulation of the operation of the group of network pumps at the operation of the CHPP on the thermal load schedule in the summer period/ О. P. Lasurenko, M. M. Kruhoh // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 31. (1253) – P. 46 – 52.– Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.**

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

**Лазуренко Олександр Павлович** – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних станцій, тел. +38 050 9380 348, e-mail Lasurenko@kpi.kharkov.ua

**Lasurenko Olexandr Pavlovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Professor at Power Plant Department, tel. +38 050 9380 348, e-mail Lasurenko@kpi.kharkov.ua

**Кругол Микола Михайлович** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел. +38 095 5220 835, e-mail kruhgol@gmail.com

**Kruhoh Mikola Myhailovich** – postgraduate student, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, postgraduate student at Power Plant Department, tel. +38 095 5220 835, e-mail kruhgol@gmail.com

**Івахнов Андрій Віталійович** – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел. +38 066 0293 422, e-mail undrey@mail.ru

**Ivahnov Andriy Vitaliyovich** – student, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, student at Power Plant Department, tel. +38 066 0293 422, e-mail undrey@mail.ru

УДК 621.319

*И. А. МИРЧУК, А. В. БЕСПРОЗВАННЫХ***ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИЙ СУДОВЫХ КАБЕЛЕЙ**

Показано, что для современных судов характерна высокая насыщенность электрическим оборудованием и, как следствие, специальными судовыми кабелями. Представлена динамика повышения длительно допустимой рабочей температуры на жиле с применением новых современных изоляционных композиций судовых кабелей. Внедрение радиационно-модифицированной изоляции на основе этиленпропиленовой резины позволяет повысить температуру до 120 °С со значительным уменьшением наработки. Обоснована на основании численного теплового расчета длительно допустимая рабочая температура силового кабеля с радиационно-модифицированной этиленпропиленовой изоляцией.

**Ключевые слова:** судовые кабели, современные изоляционные композиции, длительно рабочая температура, нормируемая наработка, длительно токовая нагрузка.

Показано, що для сучасних суден притаманна висока насиченість електричним обладнанням і, як наслідок, спеціальними судовими кабелями. Представлена динаміка підвищення довготривалої робочої температури на жилі із застосуванням сучасних ізоляційних композицій судових кабелів. Впровадження радіаційно-модифікованої ізоляції на основі етиленпропиленової гуми дозволяє підвищити температуру до 120 °С зі значним скороченням часу на відмову. Обґрунтовано на основі чисельного теплового розрахунку довготривала робоча температура силового кабелю з радіаційно-зшитою етиленпропиленовою ізоляцією.

**Ключові слова:** судові кабелі, сучасні ізоляційні композиції, довготривала робоча температура, нормований час на відмову, довготривале струмове навантаження.

It is shown that modern ships are characterized by high saturation of electrical equipment, and consequently, of special marine cables. Given the specific operating conditions for electrical insulation shipboard cables strict requirements for electrical, mechanical, and fire performance. on modern shipboard cable is allowed to use only a limited range of insulation materials, reliability and durability has been confirmed by practical application at the facilities for a long time. The dynamics of increasing long-term allowable working temperature in the core with the use of new modern compositions insulating power, control cables which ensuring an increase in current load at a constant cross-section of conductors. The compositions based on polyvinylchloride for an operating temperature up to 70 °C are excluded from the list of insulating compositions permitted to be used not only in the power cables, but also for all types of marine cables (power, control, data). Applying of radiation-modified EPR insulation can increase the temperature to 120 °C with a significant, more than 3 times, decreasing operating time compared to non-crosslinked rubber and modified polyethylene. These polymer compositions provide long operating temperature on the conductive core 90 °C. Substantiated on the basis of numerical calculation of the heat for a long time permissible operating temperature of the power cable c radiation-modified EPR insulation.

**Keywords:** shipboard cables, insulation, modern composition, long-term working temperature, normability operating time, duration of the current load.

**Введение.** Современные суда характеризуются высокой степенью электрификации. Последние достижения автоматического управления, вычислительной и полупроводниковой техники сделали возможным автоматизацию многих производственных процессов на судне. На современных морских судах устанавливаются сотни электрических машин, электрических аппаратов и приборов и прокладываются сотни километров кабеля для их функционирования. Мощность судовых энергетических установок достигает нескольких тысяч киловатт, а мощность отдельных электроприводов составляет несколько сотен киловатт. Можно ожидать, что в недалеком будущем некоторые суда будут иметь энергетические установки мощностью 50–200 МВт. Передача и распределение электрической энергии на судах осуществляются в основном с использованием кабелей. На участках небольшой длины и при больших токах иногда применяются шинопроводы. Сечение токопроводящих жил, а значит, масса и габариты кабелей и кабельных трасс, определяются главным образом величиной тока, передаваемого по ним. При заданном напряжении величина тока пропорциональна величине передаваемой мощности. Поэтому с ростом мощно-

сти судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) увеличиваются масса и габариты кабельных трасс.

**Судовые кабели:** предназначены для стационарной и подвижной прокладки на судах морского флота неограниченного района плавания, речного флота, плавучих и береговых сооружениях в силовых и осветительных сетях, в цепях управления, сигнализации, контроля и связи. Судовые кабели низкого напряжения подразделяют:

– **по номинальному рабочему напряжению**, которое устанавливается из ряда: 150/250, 450/750, 600/1000 В для переменного тока; 500, 1200 В для постоянного тока;

– **по назначению:** силовые, контроля и управления, связи и комбинированные;

– **по используемым материалам для изоляции и оболочки** (в резиновом и пластмассовом исполнении);

– **по конструктивным особенностям** (наличие огнестойкого барьера жил, индивидуального или общего электростатического экрана, брони из стальных оцинкованных проволок или лент);

– **по пожарным характеристикам** (выполнение требований по низкому дымообразованию,

© И. А. Мирчук, А. В. Беспрозванных, 2017

стойкости к распространению горения при одиночной или пучковой прокладке, содержанию галогенов в используемых полимерных материалах). С ростом насыщенности судов кабелями, предъявляются все более жесткие требования по электрическим, механическим и пожарным характеристикам, как к отдельным кабелям, так и кабельным трассам в целом. В настоящее время, совершенствование наиболее востребованных и широко используемых кабелей низкого напряжения (до 1,0 кВ) осуществляются по двум основным направлениям: повышение пожарной безопасности кабелей и повышение длительно допустимой рабочей температуры жилы посредством применения новых, более теплостойких, материалов. Повышение длительно допустимой рабочей температуры кабелей позволяет добиться увеличения токовых нагрузок при неизменном сечении токопроводящих жил.

**Целью статьи** является обоснование оптимальной длительно допустимой рабочей температуры современных полимерных изоляционных композиций с учетом режимов эксплуатации судовых кабелей.

**Проблема повышения рабочей температуры судовых кабелей.** Согласно нормам, приведенным в [1], длительно допустимая температура токопроводящей жилы устанавливается в зависимости от применяемого материала изоляции и оболочки на уровне:

- не более 65 °С для кабелей типа КНР с изоляцией из резины на основе натурального и бутадиенового каучуков и оболочкой из резины на основе хлоропренового каучука;

- не более 75 °С для кабелей типа КНРк с резиновой изоляцией и оболочкой из ПВХ пластиката;

- не более 85 °С для кабелей типа КРКВ с изоляцией из кремнийорганической резины и кабелей типа КСРПВ и изоляцией из радиационно-сшитого полиэтилена и оболочкой из ПВХ пластиката. Учитывая специфику условий эксплуатации (длительная автономная работа судов в водах мирового океана в условиях частой смены различных климатических факторов), к судовым кабелям предъявляются более высокие требования по электрическим, монтажным характеристикам, стойкости к внешним воздействующим факторам (см. табл. 1), чем к кабелям общепромышленного назначения. Поэтому для современных судовых кабелей допускается к применению лишь ограниченный перечень изоляционных материалов, надежность и долговечность которых подтверждена практическим применением на объектах в течение длительного времени.

**Современные изоляционные композиции для судовых кабелей с повышенной рабочей температурой.** В [3] установлены нормы по обеспечению максимальной допустимой температуры на жиле до 90–95 °С для большинства изоляционных материалов (см. табл. 2). Как видно из таблицы 2, перечень изоляционных материалов, допустимых для изоляции судовых кабелей, был дополнен новым типом изоляции – изоляционной композицией

HF 90. К этому типу изоляционных материалов относятся сшитые безгалогенные композиции на основе полиолефинов. Для повышения стойкости материалов к распространению горения, их наполняют значительным (до 70 % по массе) количеством антипиренов [4].

Таблица 1 – Требования к судовым кабелям по стойкости к внешним воздействующим факторам (ВВФ) [2]

Вид ВВФ	Характеристика ВВФ, единица измерения	Значение
1. Синусоидальная вибрация	Диапазон частот, Гц	1 – 500
	Амплитуда ускорения, м/с <sup>2</sup> (g)	до 100 (10)
2. Механический удар одиночного действия	Пиковое ударное ускорение, м/с <sup>2</sup> (g)	10000 (1000)
	Длительность действия ударного ускорения, мс	0,1 – 2
3. Повышенная температура среды	Максимальное значение, °С	60
4. Пониженная рабочая температура среды	Температура среды, °С, в условиях:	
	– стационарной прокладки	минус 50
	– монтажных изгибов	минус 15
	– изгибов кабелей подвижной прокладки	минус 30
5. Изменение температуры	От повышенной температуры до пониженной температуры среды, °С	плюс 60 - минус 50
6. Повышенная влажность	Относительная влажность воздуха при температуре 35 °С, %	До 100
7. Морская вода (соляной туман)	Морская вода с содержанием солей до 3,5 % при температуре, °С	минус 4 – плюс 35
8. Гидростатическое давление	Радиальная герметичность при давлении, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ):	
	– кабелей для стационарной прокладки	2,0 (20)
	– кабелей подвижной прокладки	5,0 (50)
9. Солнечное излучение	Верхнее значение интегральной плотности потока излучения, Вт/м <sup>2</sup>	1120
10. Плесневые грибы	Степень биологического обрастания, балл, не более	2
11. Агрессивные химические вещества (индустриальные масла и дизельное топливо)	Температура, °С	100
	Время выдержки, ч	24

Однако введение в полимерную матрицу антипиренов приводит к снижению диэлектрических и

физико-механических свойств материала вследствие чего нормируемые значения удельного объемного электрического сопротивления, сопротивления изоляции, прочности и относительного удлинения при разрыве для изоляционной композиции типа HF 90 снижены по сравнению с другими материалами на основе полиолефинов, такими как этиленпропиленовая резина EPR, высокомодульная или повышенной твердости этиленпропиленовая резина HEPR, сшитый полиэтилен XLPE (табл. 3, табл. 4).

Таблица 2 – Типы изоляционных композиций для судовых кабелей согласно [3]

Тип изоляционного компаунда	Обозначение	Максимально допустимая температура на токопроводящей жиле, °С при режимах работы кабеля	
		Нормальный режим работы	Короткое замыкание
а) термопластичный:			
– на основе поливинилхлорида или сополимера винилхлорида и винилацетата	PVC	70	150
б) эластомерный или термопластичный:			
– на основе этиленпропиленовой резины или аналогичного материала;	EPR	90	250
– на основе высокомодульной или повышенной твердости этиленпропиленовой резины	HEPR	90	250
– на основе сшитого полиэтилена	XLPE	90	250
– на основе сшитого полиолефинового материала	HF 90	90	250
– на основе кремнийорганической резины	S 95	95	350*
* значение не распространяется на кабели с жилой из луженой медной проволоки и применимо только для силовых кабелей			

Но, несмотря на некоторое снижение диэлектрических и физико-механических характеристик, применение при изготовлении судовых кабелей безгалогенных композиций с повышенной стойкостью к распространению горения является достаточно перспективным, т.к. позволяет значительно повысить пожаробезопасность, как самих кабелей и кабельных трасс, так и объекта, на котором они прокладываются, в целом. С выходом стандартов [5], [6] композиции на основе поливинилхлорида (тип PVC) на рабочую температуру до 70 °С были исключены из перечня изоляционных композиций,

допущенных к применению в современных судовых кабелях. Таким образом, на сегодняшний день, все материалы, применяемые для изоляции судовых кабелей, должны обеспечивать рабочую температуру на токопроводящей жиле до 90–95 °С.

Тенденция к повышению рабочих температур, а соответственно и возможности передачи большего количества энергии при неизменном сечении токопроводящей жилы, сохраняется. Например, в Индии установлены требования к длительно допустимой температуре на токопроводящей жиле для судовых кабелей на уровне 120 °С [7]. Такая рабочая температура на жиле обеспечивается применением для изоляции кремнийорганических резин, сшиваемых радиационным способом специальных этиленпропиленовых композиций или безгалогенных композиций на основе сополимеров.

Помимо величины максимально допустимой рабочей температуры, важным является и то, как долго кабель будет работать при таком режиме в течение всего срока службы. Параметром, определяющим продолжительность работы кабеля при заданных условиях эксплуатации, является наработка. Нарботку, которая находится в прямой зависимости от рабочей температуры на жиле, определяют на этапе разработки кабеля.

В таблице 5 приведена нормируемая наработка, применяемых в настоящее время, судовых кабелей стационарной прокладки в зависимости от максимальной рабочей температуры на жиле.

Учитывая последние тенденции к увеличению минимального срока службы проектируемых и строящихся судов, в пределах которого обеспечивается наработка кабелей, наработка в 40 тыс. часов при температуре на жиле 120 °С (см. табл. 1) представляется недостаточной. После набора указанного числа часов наработки, кабель может использоваться далее, но при этом нет каких-либо гарантий его дальнейшей бесперебойной работы. В случае выхода кабеля из строя, будет необходима его замена, что на судах, во многих случаях, из-за особенностей их конструкции, практически невозможно осуществить. Более приемлемым вариантом обеспечения минимального значения наработки судовых кабелей с радиационно-сшиваемой этиленпропиленовой композицией на уровне современных требований (не менее 130 тыс. часов) является снижение рабочей температуры на жиле со 120 °С до 100 °С. Это, если применить правило Вант-Гофа, в соответствии с которым, при увеличении (уменьшении) температуры на 10 °С скорость большинства гомогенных реакций увеличивается (уменьшается) в 2-4 раза, позволит увеличить наработку кабелей до 160 тыс. часов. На рис.1 представлены результаты численного теплового расчета одиночно проложенного одножильного судового кабеля при переменном напряжении частоты 50 Гц, основанного на применении метода дискретных резистивных схем замещения и метода узловых потенциалов [8].

Таблица 3 - Требования к электрическим параметрам изоляционных композиций для судовых кабелей

Наименование параметра	EPR	HEPR	XLPE	HF 90	S 95
Постоянная сопротивления изоляции $K_i$ (МОм·км): – при 20 °С, не менее – при максимальной рабочей температуре, не менее	3670 3,67	3670 3,67	3670 3,67	550 0,55	1850 1,85
Удельное объемное электрическое сопротивление $\rho$ (Ом·см): – при 20 °С, не менее – при максимальной рабочей температуре, не менее	$1,0 \times 10^{15}$ $1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{15}$ $1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{15}$ $1,0 \times 10^{12}$	$1,5 \times 10^{14}$ $1,5 \times 10^{11}$	$5,0 \times 10^{13}$ $5,0 \times 10^{10}$
Увеличение емкости при переменном токе после погружения в воду при 50 °С (%): – между концом 1-го и концом 14-го дня, не более – между концом 7-го и концом 14-го дня, не более	15 5	15 5	– –	15 5	15 5

Таблица 4 - Требования к физико-механическим параметрам изоляционных композиций для судовых кабелей

Наименование параметра	Значение параметра				
	EPR	HEPR	XLPE	HF 90	S 95
1. Механические параметры до старения					
1.1 Прочность при растяжении, не менее, Н/мм <sup>2</sup>	4,2	8,5	12,5	9,0	5,0
1.2 Относительное удлинение при разрыве, не менее, %	200	200	200	120	150
2. Механические характеристики после старения в термостате. Условия испытания: – температура, °С – продолжительность воздействия, ч	135 168	135 168	135 168	135 168	200 240
2.1 Прочность при растяжении: – минимальное значение, Н/мм <sup>2</sup> – отклонение, не более, %	- ±30	- ±30	- ±25	- ±30	4,0 -
2.2 Относительное удлинение при разрыве: – минимальное значение, % – отклонение, %, не более	- ±30	- ±30	- ±25	100 ±30	120 -
3. Испытание на тепловую деформацию. Условия испытания: – температура, °С – продолжительность воздействия, ч – механическое напряжение, Н/см <sup>2</sup>	250 15 20	250 15 20	200 15 20	200 15 20	250 15 20

Таблица 5 – Нормируемая наработка судовых кабелей стационарной прокладки в зависимости от максимальной рабочей температуры на жиле

Нормативный документ	Материал изоляции (тип изоляции)	Максимальная рабочая температура на жиле, оС	Наработка при максимально допустимой температуре на жиле, часов, не менее
ГОСТ 7866.1	Резина	65	50 000
		55	100 000
ГОСТ 7866.2	Резина	75	50 000
		70	80 000
ГОСТ 7866.3	Сшитый полиэтилен (XLPE)	85	88 000
ТУ У 3.67-00217099.013-97	Резина (EPR)	85	50 000
ТУ У 3.67-00217099.015-97	Сшитый полиэтилен (XLPE)	85	50 000
ТУ У 31.3-00217099-009-2003	Резина (EPR) Сшитый полиэтилен (XLPE)	90	130 000
Технические требования EED-50-12 (Rev 2)	Радиационно-сшиваемая этиленпропиленовая композиция	120	40 000



Кабель находится в воздухе, температура которого принята равной 45 °С. Толщина изоляции составляет 2,4 мм, толщина защитной полимерной оболочки – 5 мм. Приведено в зависимости от максимальной рабочей температуры медной жилы сечением 240 мм<sup>2</sup> распределение температуры по толщине изоляции: М=240 слоев, на которые разбивается изоляция. Кривая 1 соответствует случаю, когда максимальная длительная температура на жиле равна 65 °С, кривая 2 – 120 °С и кривая 3 – 100 °С соответственно.

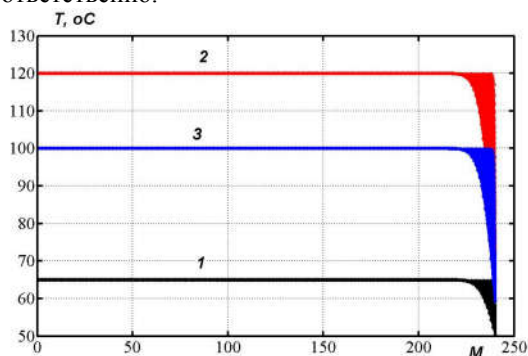


Рис.1 – Распределение температуры по толщине изоляции судового кабеля в зависимости от максимально допустимой рабочей температуры на медной токопроводящей жиле сечением 240 мм<sup>2</sup>

При увеличении температуры с 65 °С до 120 °С допустимая активная мощность потерь возрастает более чем в 3 раза: с 18 Вт/м до 69 Вт/м. При этом длительная максимальная токовая нагрузка на кабель возрастает в 1,79 раза. Уменьшение максимальной рабочей температуры с 120 °С до 95-100 °С приводит к снижению допустимых активных потерь в 1,36 раза и допустимой токовой нагрузки на 13 %.

Для наиболее удаленных от максимально нагретой токопроводящей жилы слоев изоляции неравномерность распределения температуры выражена в меньшей степени (см. рис.1 кривые 3 и 2). Это является фактором, который уменьшает термомеханические напряжения и вероятность образования микротрещин в изоляции судовых кабелей, которые подвергаются постоянному воздействию вибраций.

Результаты численного расчета согласуются с техническими данными по допустимой токовой нагрузке для одиночно прокладываемых судовых кабелей при переменном напряжении частоты 50 Гц. Так, для кабеля типа КНРЭ с медной токопроводящей жилой сечением 240 мм<sup>2</sup> при длительном нагреве токопроводящих жил до +65 °С и температуре окружающего воздуха +45 °С токовая нагрузка составляет 485 А, расчетное значение – 466 А.

**Выводы.** Повышение рабочей температуры судовых кабелей имеет свои неоспоримые преимущества, как в ценовом (снижение сечения токопроводящих жил уменьшает затраты на кабельно-

проводниковую продукцию), так и в массовом выражении (снижение массы кабельных трасс и, как следствие, увеличение полезной нагрузки судна).

Однако с увеличением пропускной способности кабелей необходимо учитывать то, что повышение рабочей температуры способствует выделению этими же кабелями в окружающее пространство большего количества тепловой энергии. При высокой насыщенности кабелями современных судов, прокладке кабельных трасс в ограниченном замкнутом пространстве, это приводит к увеличению тепловой нагрузки, как на отдельных участках, так и на объекте в целом.

Поэтому существующие на сегодня для судовых кабелей нормы по максимальной рабочей температуре на уровне 90-95 °С являются оптимальными и наиболее обоснованными как по эксплуатационным показателям, так в плане надежности.

**Список литературы:** 1. ГОСТ 7866.1–76–ГОСТ 7866.3–76 Кабели судовые. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 96 с. 2. ТУ У 31.3–00217099–009–2003 Кабели судовые. Технические условия. 3. IEC 60092 – 351:2004 Electrical installations in ships – Part 351: Insulating materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation, telecommunication and data cables. Third edition, 2004. – 20 p. 4. Михайлин Ю. А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2011. – 416 стр., ил. 5. IEC 60092–353:2016 Electrical installations in ships – Part 353: Power cables for rated voltages 1 kV and 3 kV. Edition 4.0, 2016. – 46 p. 6. IEC 60092–360:2014 Electrical installations in ships – Part 360: Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables. Edition 1.0, 2014. – 54 p. 7. EED–50–12 Statement of technical requirements for electric cables thin-wall insulated, electron beam cross-linked irradiated cables. Revision 2, – 2014. – 161 p. 8. Беспрозванных А. В. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций / А. В. Беспрозванных, Б. Г. Набока // Навчальний посібник. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2012. – 108 с.

**References:** 1. GOST 7866.1–76–GOST 7866.3–76 Kabeli sudovye. Tehnicheskie uslovija [State Standard 7866.1–76–7866.3–76 Ship cables. Technical requirements]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1987. 96 p. 2. TU U 31.3–00217099–009–2003 Kabeli sudovye. Tehnicheskie uslovija [Ship cables. Technical requirements]. 3. IEC 60092–351:2004 Electrical installations in ships – Part 351: Insulating materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation, telecommunication and data cables. Third edition, 2004. 20 p. 4. Mihajlin Ju. A. *Teplo-, termo- i ognestojkost' polimernyh materialov* [Heat, thermal and flame resistance of polymeric materials]. Saint Petersburg, Nauchnye osnovy i tehnologii Publ., 2011. 416 p., ill. 5. IEC 60092–353:2016 Electrical installations in ships – Part 353: Power cables for rated voltages 1 kV and 3 kV. Edition 4.0, 2016. 46 p. 6. IEC 60092–360:2014 Electrical installations in ships – Part 360: Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables. Edition 1.0, 2014. 54 p. 7. EED–50–12 Statement of technical requirements for electric cables thin-wall insulated, electron beam cross-linked irradiated cables. Revision 2, 2014. 161 p. 8. Bezprozvannyh. G. V. Mathematic models and methods of calculation of electrical designs / G. V. Bezprozvannyh, B. G. Naboka // Tutorial. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012. 108 p.

Поступила (received) 12.01.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Обґрунтування оптимальної тривало дозвленої температури сучасних полімерних ізоляційних композицій судових кабелів/ І. А. Мирчук, Г. В. Безпрозваних // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 53 – 58. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Обоснование оптимальной длительно допустимой рабочей температуры современных полимерных изоляционных композиций судовых кабелей/ И. А. Мирчук, А. В. Беспрозванных // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 53 – 58. Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**The substation of the optimum long term operating temperature of modern polymer insulating composition of ship cables / I. A. Mirchuk, G. V. Bezprozvannykh // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1253). – P. 53 – 58. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.**

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

**Мірчук Ігор Анатолійович** – науковий співробітник приватного акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості»; м. Бердянськ; тел.: (066) 828-85-54; e-mail: [garik710@ukr.net](mailto:garik710@ukr.net).

**Mirchuk Ihor Anatoliyovich** – research associate of Private Joint Stock Company "Ukraine Scientific-Research Institute of Cable Industry"; Berdyans'k; tel.: (066) 828-85-54; e-mail: [garik710@ukr.net](mailto:garik710@ukr.net).

**Безпрозваних Ганна Вікторівна** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, тел. (057) 707 – 60-10; e-mail: [bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua](mailto:bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua).

**Bezprozvannykh Ganna Victorivna** - Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Department of electroinsulation and cable techniques, tel.: (057) 707-60-10; e-mail: [bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua](mailto:bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua)

УДК 620.92

С.О. ФЕДОРЧУК

**ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯЦІЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ У ЕНЕРГОСИСТЕМІ**

Проведено літературний огляд сучасного стану відновлювальної енергетики в Україні та світі. Проаналізовано особливості генерації за допомогою відновлювальних джерел енергії та її відмінності від традиційної генерації. Проаналізовано основні елементи, що входять до системи з розподіленою генерацією. Розглянуто та порівняно між собою діючі та перспективні засоби акумуляції енергії.

**Ключові слова:** відновлювальні джерела енергії, розподілена генерація, акумуляція, енергоефективність, літературний огляд, оптимізація режимів роботи.

Проведен литературный анализ современного состояния возобновляемой энергетики в Украине и мире. Проанализированы особенности генерации с использованием возобновляемых источников энергии и её отличия от традиционной генерации. Проанализировано основные элементы, входящие в систему распределенной генерации. Рассмотрено и проведено сравнение между собой действующие и перспективные способы аккумуляции энергии.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, распределенная генерация, аккумуляция, энергоэффективность, литературный обзор, оптимизация режимов работы.

Literary analysis of the current state of renewable energy in Ukraine and the world was performed. The features of the generation from renewable energy sources was inspect. Differences in using renewable and traditional recourses in electrical energy generation examined. Main elements of distributed generation system identified and described. Pros and cons of using renewable energy sources in traditional and distributed energy grid examined. Current and future methods of energy accumulation identified and described. Technical characteristics and specific cost of different accumulation systems sum up. Also possibility of using highly mobile electric power stations with the traditional energy sources was analyzed. Their kinds, pros and cons inspected. The conclusions about the advisability of renewable sources using and additional conditions of operation were made.

**Keywords:** renewable energy, distributed generation, accumulation, energy efficiency, a literature review, optimization of power plants operations.

**Вступ.** На сьогоднішній день генерація електричної енергії на основі відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) має ряд переваг перед традиційною генерацією на викопному паливі. Це зниження шкідливих викидів в атмосферу, невичерпність та зменшення залежності від країн експортерів викопного палива.

Основна кількість електричної енергії, що виробляється на території України [1], отримується завдяки спалюванню вугілля (42%) чи виробництву на атомних електростанціях (43%). На долю відновлювальної енергії приходиться близько пів відсотка.

Зараз в Україні діють програми стимулювання зеленої генерації. Це зелений тариф, що дозволяє реалізовувати електричну енергію за спеціальними цінами юридичним фірмам та фізичним особам. Останні навіть можуть оформити його за декілька спрощеною схемою в разі будівництва електростанцій з потужністю менше 30 кВт. Також діють міжнародні організації, які дозволяють отримувати кредити на обладнання з меншою відсотковою ставкою.

Генерація електричної енергії з ВДЕ має велику кількість переваг і стимулів для розвитку, але обмежена швидкість зростання такого типу електростанцій обумовлена природою джерел їх енергії та безперервним процесом виробництва → передача → споживання електричної енергії. Саме тому в основі цієї роботи лежить огляд існуючих методів оптимізації роботи ВДЕ у енергосистемі країни.

Якщо ми порівняємо основні аспекти роботи електростанцій, що використовують традиційні та

відновлювальні джерела енергії то зможемо виділити основні переваги та недоліки кожного варіанту. Електростанціям, що використовують традиційні види палива присутні декілька спільних характеристик. Їх розміщення мало залежить від джерел палива, вони займають малу питому площу, їх режими роботи не залежать від природних факторів та вони можуть змінювати потужність генерації у рамках встановленої потужності. При тому можливо виділити в них і загальні негативні риси. На сам перед до них можливо віднести обмеженість ресурсної бази (більш властиво тепловим електростанціям), та екологічні наслідки від виробничого процесу.

Електростанції на відновлювальних джерелах, демонструють майже повну протилежність до традиційних. Їх ресурсна база майже необмежена, та виробництво електричної енергії майже не несе екологічних наслідків. При тому їх ефективність дуже залежить від розміщення, пори року, періоду доби та погодних умов, саме тому прогнозування генерації на цих типах електричних станцій значно ускладнено. Вони мають високу питому собівартість та найчастіше площа, що необхідна для виробництва електричної енергії, значно більша ніж у традиційних електростанцій.

Отже оптимізація режимів роботи електричних станцій на відновлювальних джерелах енергії [2] зводиться до створення умов, коли вони отримують максимальний прибуток від виробництва та реалізації електричної енергії з виконанням всіх обмежень технологічного та електричного характеру. Крім того в якості орієнтира для оптимізації також можливо використовувати умову найменшого впли-

ву ВДЕ на енергосистему, мінімізацію відхилення між плановим та фактичним постачанням та мінімізації кількості електроенергії, що береться до локальної енергосистеми ззовні.

На сьогоднішній день для боротьби з недоліками ВДЕ використовують акумуляцію, високоманеврові електростанції та гідроакумуляційні електростанції. Розподілена генерація використовує ВДЕ в якості одного з своїх основних аспектів та намагається оптимізувати їх вплив на електричні мережі та режими їх роботи.

**Розподілена генерація.** В рамках концепції інтелектуальних мереж [3] ВДЕ найчастіше пов'язують з розподіленою генерацією енергії. У традиційній системі постачання енергія від крупних електричних станцій поступає навіть найвіддаленішим споживачам, що неодмінно пов'язано з втратами та підвищенням вартості електричної енергії. На відміну від цього у розподіленій системі генеруючі об'єкти невеликої потужності (до 50 МВт) разом з акумуляційними пристроями розташовані у безпосередній близькості до споживача, працюють паралельно з мережею чи окремо від неї, та мають можливість використання технологій інтелектуальних мереж. Таке розташування генеруючих та акумуляційних потужностей дуже вигідно для України, так як втрати електроенергії становлять близько 10% від обсягів транспортованої, крім того воно дозволяє залучити до процесу генерації з використанням ВДЕ населення у значно більшому обсязі.

У наш час розподілена генерація займає дуже важливе місце при плануванні розвитку електричних мереж у розвинених країнах. Вже зараз приблизно 10% від усієї виробленої у ЄС електроенергії генерується завдяки розподіленій генерації. У Данії таким чином виробляється 50% від загальної кількості електричної енергії.

**Елементи ВДЕ у розподіленій генерації.** Розглянемо більш детально кожен з цих елементів.

**Вітрові турбіни** дають змогу перетворювати механічну енергію вітру на електричну енергію. Переваги використання вітрових турбін: робота на відновлювальному джерелі енергії, можливість працювати в режимі 24/7, відсутність забруднення навколишнього середовища, модульність системи та лінійне співвідношення потужності та ціни обладнання. Основні недоліки: висока початкова вартість, низька прогнозованість генерації та більший в порівнянні з сонячними електростанціями вплив на оточуюче середовище.

**Фотоелектричні панелі** в якості джерела енергії використовують сонячну радіацію. До переваг можна віднести роботу на відновлювальному джерелі енергії, відсутність забруднення навколишнього середовища, відсутність шуму. До недоліків відносять залежність від світового дня та хмарності, вартість, невисокий ККД.

**Газові мікротурбіни** використовують в якості резервного джерела живлення. Переваги такого обладнання це невисока ціна та висока маневреність.

**Паливні комірки** (елементи Fuel Cells) – це електрохімічні пристрої для перетворення хімічної енергії на електричну. Від гальванічних пристроїв відрізняються тим, що для реакції використовують не власну енергію, а поглинають її з водню та кисню. Водень отримують з викопних видів палива, а кисень з повітря. На виході з установки ми отримуємо енергію та воду. Переваги над звичайною генерацією це висока ефективність, низьке забруднення довколишнього середовища, низький шум та швидке встановлення обладнання. Але в такому обладнанні є негативні аспекти, це висока ціна, підвищені вимоги до персоналу та палива та малий досвід світового використання, необхідність витратити енергію на отримання водню для генерації. Але останній недолік можливо трактувати в якості можливості для акумуляції енергії.

**Малі ГЕС** – гідроелектростанції потужністю до декількох МВт. Фахівці вважають, що для ГЕС з малими встановленими потужностями асинхронні генератори мають істотні переваги порівняно з синхронними. Це пов'язано з низькою вартістю, простотою конструкції, стійкістю до аварій, простотою експлуатації та значним ресурсом. Але ГЕС з асинхронними двигунами мають ряд недоліків: регіональна залежність від ресурсів, неможливість регулювання напруги та споживання реактивної потужності, коливання активної потужності.

Якщо розгорнуто проаналізувати переваги ВДЕ то комплексно можливо виділити наступні:

- майже невичерпне джерело енергії, що дозволить зменшити залежність від імпортерів ресурсів;
- при використанні ВДЕ генерація майже не призводить до викидів шкідливих речовин до атмосфери;
- такі джерела енергії більш вигідні ніж традиційні бо не залежать від світових коливань цін на енергоресурси.

Також існують і спільні недоліки притаманні усім ВДЕ:

- надійність постачання залежить від сукупності зовнішніх факторів таких, як час доби, погода, пора року;
- складність прогнозування генерації енергії;
- для генерації великої кількості енергії необхідно використання значної території під устаткування;
- великі капітальні витрати пов'язані із значними начальними інвестиціями;
- залежність ефективності від територіально-го розташування.

Інвертори, що використовуються при генерації на сонячних та вітряних електростанціях, призводять до пошкодження ізоляції. Проблеми проявляються в зміні форми синусоїди та імпульсах перенапруги. Нестабільна генерація призводить до виникнення проблем у системі розподілення та передачі електроенергії. Цю компенсують за допомогою

систем акумуляції або високоманевровими електростанціями на традиційних видах палива.

**Особливості використання розподіленої генерації.** Окрім особливостей використання ВДЕ розподілена генерація також призводить до нових проблем:

- зниження якості електричної енергії, що викликано великою кількістю трансформуючих пристроїв;
- виникнення надлишків потужності та проблем з регулюванням частоти;
- поява реверсивних потоків потужності;
- необхідність забезпечення стійкості системи за умови відключення великої кількості установок;
- складність обслуговування фідерів з активними споживачами та розподіленою генерацією.

**Акумуляція в розподілених електричних мережах.** Для боротьби з недоліками ВДЕ пов'язаними з нестабільністю генерації енергії та залежністю від періоду доби використовують акумуляцію та швидко маневрові резервні електричні станції. Зараз для використання в розподілених мережах і не лише в них прийнято розглядати наступні типи акумулюючих систем [5]:

ГАЕС являються найстарішим видом акумуляційної системи, який можливо також віднести і до швидко маневрового резерву. Принцип дії цієї системи ми вже розглянули під час порівняння основних типів електричних станцій. Для використання потребує створення верхнього та нижнього резервуарів та штучного перепаду висот.

Акумуляція за допомогою стиснутого повітря використовує надлишкову енергію для стиснення повітря, яке зберігається у герметичному, ізольованому резервуарі. При необхідності стиснуте повітря випускається з резервуару, нагрівається та подається на турбіну з'єднану з генератором. Зараз ця технологія використовується у поєднанні з офшорними вітроелектростанціями та у декількох геологічно пристосованих печерах поряд з традиційними електростанціями.

Хімічні акумулятори — пристрої для отримання електричного струму та напруги в якості результату хімічної реакції. Зазвичай використовуються групою однотипних батарей. Зараз активно вдосконалюються електричними, електронними та автомобільними компаніями світу.

Маховики в якості акумулюючого електричну енергію пристрою активно досліджуються відносно нещодавно. Пристрій складається з махового колеса, що обертається на дуже високій швидкості та пов'язано з електричним апаратом, який працює в якості двигуна або генератора. Використання магнітних підшипників та вакуумної камери дозволяє зменшити втрати енергії при збереженні. Основні проблеми при використанні в дуже високій швидкості віддачі енергії (мілісекунди/секунди) та фізичних характеристиках робочого тіла

Надпровідні акумулятори — акумулюючі системи, що складаються з нескінченно довгого (за-

мкнутого) провідника з нульовим опором. Система компактна, енергоємна та здатна без втрат зберігати енергію доки не втрати надпровідний стан. Для використання необхідно постійно підтримувати систему в надпровідному стані, що потребує додаткового охолодження і як наслідок додаткової витрати енергії. Роботи з дослідження таких систем активно ведуться у всьому світі.

Існуючі акумулюючі системи потребують додаткових умов для своєї роботи та як наслідок оптимально використовуються лише у конкретних умовах, саме тому для порівняння занесемо їх основні характеристики до таблиць 1 і 2.

Таблиця 1 – Технічні характеристики акумулюючих систем

Назва системи	Потужність	Поточна вартість \$/кВт	ККД
ГАЕС	Існують до 2.1 ГВт	500-1600	0.75
Хімічні акумулятори	100 Вт 20 МВт	750-1000 (20-40 МВт, 2 години) 500-600 (20-40 МВт, 30 хв) 400-600 (до 2 МВт, 10- 20 сек)	0.5 - 0.8
Акумуляція за допомогою стиснутого повітря	25 МВт 350 МВт	350-500	0.75- 0.85
Супер маховики	Окремі установки у кіловатному діапазоні, але можливо масштабування	Стальні: 500 (до 1 МВт, 15 сек) Модифіковані 6000 (1 кВт) 3000 (20 кВт)	>0.9
Надпровідники	1-10 МВт (мікро) 10-100 МВт	Досліджується	

Таблиця 2 – Особливості використання акумулюючих систем

Назва системи	Особливості використання
ГАЕС	Швидко маневровий резерв; Підтримують частоту у системі.
Хімічні акумулятори	Швидко маневровий резерв; Потребують використання інверторів; Мають обмежену кількість зарядів-розрядів.
Акумуляція за допомогою стиснутого повітря	Швидко маневровий резерв; Можливо використання природних печер.
Маховики	Дуже швидко віддають накопичену енергію ( $\pm$ ); Низький процент втрат при зберіганні;
Надпровідники	Забезпечують якість електричної енергії; відсутність втрат;

Співвідношення систем акумуляції відображено на рис. 1.

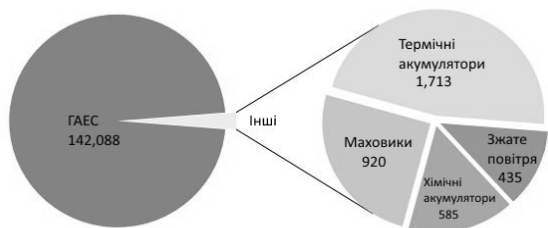


Рис 1 – Встановлені та підключені до мережі системи зберігання енергії в МВт, за технологіями, станом на 8/2015 [4]

**Високо маневрові електричні станції.** Зараз в Україні існує два типи електричних станцій, що можуть використовуватися як резервні для ВДЕ. До них відносять ГАЕС, які були розглянуті в розділі акумуляції, та газотурбінні електростанції (ГТЕС). Розглянемо другий варіант більш детально.

ТЕС з приводом електрогенератора від газової турбіни називаються газотурбінними електростанціями. ККД таких ТЕС зазвичай складає 26—28%. ГТЕС зазвичай застосовуються для покриття піків електричного навантаження, або у нашому варіанті в якості резерву для ВДЕ.

ТЕС з парогазотурбінною установкою, що складається з паротурбінного і газотурбінного агрегатів, називається парогазовою електростанцією (ПГЕС). ККД якої може досягати 42 — 43%. ГТЕС і ПГЕС також можуть відпускати тепло зовнішнім споживачам, тобто працювати як теплоелектроцентр.

При порівнянні ГТЕС та ГАЕС можливо знайти наступні відмінності: ГАЕС не потребує витрат пального, не забруднює повітря, може працювати в якості акумулятора енергії, має вищий ніж у ГТЕС ККД, ГТЕС не має прив'язки до території, може постачати теплову енергію, мають малу площу розміщення, швидко будуються.

**Висновки.** На сьогоднішній день відновлювальні джерела енергії є одними з найперспективніших ресурсів для генерації електроенергії. Однак їх використання пов'язано з виникненням ряду проблем для електричних мереж.

В якості варіанту вирішення проблеми неоптимальності генерації було розглянуто два основних рішення: акумуляція та швидко маневровий резерв.

Обидва варіанти є перспективними, але їх використання пов'язане з їх технічними особливостями. Наприклад, ГАЕС та системи стиснутого повітря мають високий ККД та низькі втрати під час збереження енергії. Але вони потребують водоймищ (ГАЕС) та надійно ізольованих порожнин. Так саме й в інших випадках, за певних умов кожен варіант акумуляції може бути найбільш доцільним. Отже вибір рішення має базуватися на об'ємах збереженої енергії, географічних умов, ККД та необхідної швидкості віддачі накопиченого.

При розгляданні резерву ситуація дуже схожа, але додається питання об'ємів резервування потужностей. Це потребує додаткових дослідів питомого резервування на одиницю потужності електростанції на ВДЕ.

Отже інтеграція ВДЕ до енергетики країни можлива, але це пов'язано з рядом додаткових проблем, бо не існує єдиного універсального рішення і оптимальний вибір обладнання потребує додаткових досліджень.

#### Список літератури:

1. Ukraine: electricity and heat [Електронний ресурс]. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: [www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2013&country=UKRAINE&product=ElectricityandHeat](http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2013&country=UKRAINE&product=ElectricityandHeat).
2. Лежнюк П. Д. Малі гідроелектростанції з асинхронними генераторами / П. Д. Лежнюк, О. В. Нікіторович, В. В. Кулік. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 142 с.
3. European SmartGrids Technology Platform [Електронний ресурс]. – 2006. – Режим доступу до ресурсу: [ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf).
4. Appendix L [Електронний ресурс] / Draft IRP - 2015. – Режим доступу до ресурсу: [pse.com/aboutpse/EnergySupply/Documents/DRAFT\\_IRP\\_2015\\_AppL.pdf](http://pse.com/aboutpse/EnergySupply/Documents/DRAFT_IRP_2015_AppL.pdf).
5. Energy storage technologies [Електронний ресурс] // energy.gov. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: [www1.eere.energy.gov/ba/pba/pdfs/append\\_overview.pdf](http://www1.eere.energy.gov/ba/pba/pdfs/append_overview.pdf).
6. Федорчук С. О. Використання концепції інтелектуальних мереж в енергосистемі України / С. О. Федорчук, І. А. Неміровський // Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка / С. О. Федорчук, І. А. Неміровський. – Харків: ХНТУСГ, 2016. – 26–28 С., 100 с.

#### References:

1. Ukraine: electricity and heat [Electronic resource]. - 2013. - Access to the website: [www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2013&country=UKRAINE&product=ElectricityandHeat](http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2013&country=UKRAINE&product=ElectricityandHeat).
2. Lejnyuk P. D. Mali gidroelektrostancii z asinhronnimi generatorami / P. D. Lejnyuk, O. V. Nikitorovich, V. V. Kulik. – Vinnica: VNTU, 2011. – 142 s.
3. European SmartGrids Technology Platform [Electronic resource]. – 2006. – Access to the website: [ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf).
4. Ap-

pendix L [Electronic resource]. – 2015. Access to the website: [pse.com/aboutpse/EnergySupply/Documents/DRAFT\\_IRP\\_2015\\_AppL.pdf](http://pse.com/aboutpse/EnergySupply/Documents/DRAFT_IRP_2015_AppL.pdf). 5. Energy storage technologies [Electronic resource] // [energy.gov](http://energy.gov). – 2015. – Access to the website: [www1.eere.energy.gov/ba/pba/pdfs/append\\_overview.pdf](http://www1.eere.energy.gov/ba/pba/pdfs/append_overview.pdf). 6.

Fedorchuk S. O. Viktoristannja koncepcii intelektual'nih merezh v energosistemi Ukraini / S. O. Fedorchuk, I. A. Nemirov'skij // Visnik HNTUSG imeni Petra Vasilenka / S. O. Fedorchuk, I. A. Nemirovskij  
*Надійшла (received) 10.12.2016*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Використання акумуляції енергії для оптимізації режиму роботи відновлювальних джерел енергії у енергосистемі / С. О. Федорчук** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017.– No 31 (1253). – С. 59 – 62. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**Использование аккумуляции энергии для оптимизации режима работы возобновляемых источников энергии в энергосистеме / С. О. Федорчук** // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПИ», 2017.– No 31 (1253). – С. 59 – 62. Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**Using the accumulation of energy to optimize the treatment of renewable energy in the grid / S. Fedorchuk** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 5. – P. 59–62. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.

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

**Федорчук Станіслав Олегович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри електричних станцій тел. : 0952901966; e-mail [majonima@gmail.com](mailto:majonima@gmail.com)

**Федорчук Станіслав Олегович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры электрических станций тел. : 0952901966; e-mail [majonima@gmail.com](mailto:majonima@gmail.com)

**Fedorchuk Stanislav Olegovich** – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», postgraduate student at the Department of electrical stations tel.: 0952901966; e-mail [majonima@gmail.com](mailto:majonima@gmail.com)

УДК 621.315

А.С. ФЕДЯЙ

## ПРОХОДНЫЕ ЕМКОСТИ В КАБЕЛЯХ С ЭКРАНИРОВАННЫМИ ВИТЫМИ ПАРАМИ

Особливістю конструкції контрольних кабелів з екранованими витими парами є гнучкий дротяний екран, накладений на симетричну пару ізованих жил, поверх скріплюючої плівки. В зазори, утворені дротами екрану може проникати слабке електричне поле. Вимірюючи прохідні ємності між парами можна отримати інформацію про стан міжекранного простору контрольного кабелю. Величини прохідних ємностей є настільки малими, що коректне їх вимірювання можливо здійснити тільки сукупним методом.

**Ключові слова:** Прохідна ємність, екранована вита пара, дротяний екран, оплетення, міжекранний простір.

Особенностью конструкции контрольных кабелей с экранированными витыми парами является гибкий проволочный экран, наложенный на симметричную пару изолированных жил поверх скрепляющей пленки. В зазоры, образованные проволоками экрана может проникать слабое электрическое поле. Измеряя проходные емкости между парами можно получить информацию о состоянии межэкранного пространства контрольного кабеля. Величины проходных емкостей настолько малы, что корректное их измерение возможно осуществить только совокупным методом.

**Ключевые слова:** Проходная емкость, экранированная витая пара, проволочный экран, оплетка, межэкранное пространство.

The design feature of control cables with shielded twisted pairs is a flexible wire screen imposed on a symmetric pair of insulated wire on top of the fastening tapes. Between the wires of the screen there are gaps through which can penetrate a weak electric field. Measuring the so-called feedthrough capacitance between the pairs you can get information about the state of the space between the screens of control cables. For the assessment of the values feedthrough capacitance made mathematical modeling of the two shielded twisted pairs electric fields, which takes into account the surface density of the screen. The field strength between the pairs in the so-called scope of weak field reaches 10 kV/m, the feedthrough capacitance does not exceed a few hundredths picofarads per meter of cable length. So small values is possible to correctly measure by the aggregate method.

**Keywords:** Feedthrough capacitance, shielded twisted pair, wire screen, the space between the screens.

**Введение.** Экранирование витых пар контрольных кабелей может быть выполнено отдельными проволоками или прядями проволок. Витые пары кабелей КПЭТИ экранированы оплеткой из прядей медных луженых проволок (рис. 1). Пряди одного направления пересекаются с прядями другого направления, образуя участки с двойной плотностью экрана и свободные участки – зазоры (рис. 2). Через эти зазоры силовые линии электрического поля могут проникать из одной пары во внешнее пространство между экранированными витыми парами (межэкранное пространство) и далее через экран соседней пары во внутреннее пространство другой пары. Таким образом, измеряя так называемые проходные емкости между соседними парами, можно получить информацию о состоянии межэкранного пространства.



Рис. 1 - Экраны пар контрольного кабеля КПЭТИ 7×2×0,7.

Величины проходных емкостей зависят от плотности оплетки, которая характеризуется коэффициентом поверхностной плотности экрана  $k_e$ , представляющим собой отношение площади по-

верхности, покрытой оплетающим материалом, к общей площади поверхности, на которую наложена проволока [3].

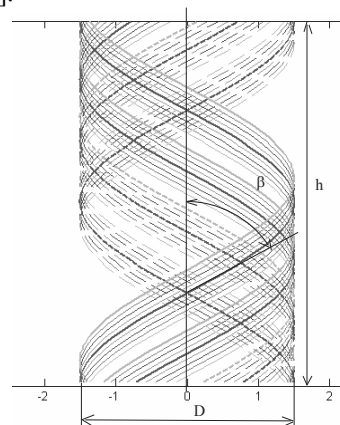


Рис. 2 - Модель проволочного экрана из прядей одного (сплошные) и другого (пунктирные линии) направления. Указаны угол оплетки ( $\beta$ ), шаг оплетки ( $h$ ) и диаметр под оплеткой ( $D$ ).

Коэффициент поверхностной плотности оплетки определяется известным соотношением:

$$k_e = k_1 + k_2 - k_1 k_2,$$

$$k_1 = \frac{d_1 n_1 a_1}{h \cdot \cos(\beta)},$$

$$k_2 = \frac{d_2 n_2 a_2}{h \cdot \cos(\beta)},$$

$$\beta = \arctg \frac{h}{\pi(D + \Delta)},$$

где  $d_1, d_2$  - диаметры проволок одного и друго-

© А. С. Федяй, 2017



го направлений оплетки;  $n_1, n_2$  - количества проволок в прядях одного и другого направлений;  $a_1, a_2$  - количества прядей одного и другого направлений оплетки;  $h$  - шаг оплетки;  $\beta$  - угол оплетки;  $D$  - диаметр под оплеткой;  $\Delta$  - толщина оплетки.

Для образца контрольного кабеля КПЭТИ  $7 \times 2 \times 0,7$  (рис. 1), в котором симметричную пару оплетают 6 прядей в двух направлениях по 5 проволок в пряди, диаметр проволоки оплетки равен 0,15 мм, угол оплетки составляет  $60^\circ$ . При такой геометрии коэффициент поверхностной плотности экрана равен 0,8. Однако степень экранирования других кабелей может отличаться и, в зависимости от особенностей конструкции и условий эксплуатации, коэффициент поверхностной плотности экрана может лежать в интервале 0,7–0,9. Соответственно, будут отличаться и величины проходных емкостей.

Для оценки изменения величин проходных емкостей в зависимости от плотности экрана рассчитаем поле двух соседних витых пар (рис. 3). Между прядями проволок экранов имеются зазоры, через которые осуществляется взаимодействие соседних пар, то есть, часть силовых линий потенциальной жилы проникает сквозь экраны и попадает на жилы соседней пары.

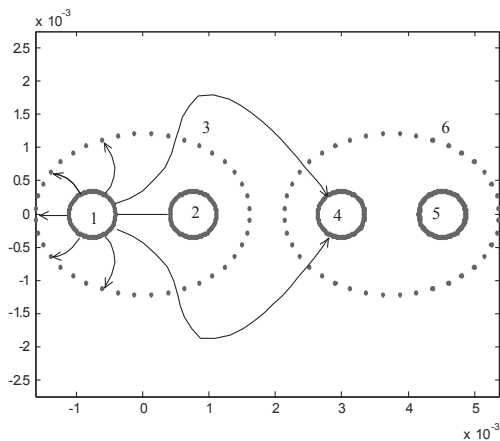


Рис. 3 - Схема расположения узлов в модели для расчета проходной емкости между экранированными витыми парами: 1, 2 – жилы первой экранированной витой пары; 3 – экран жил первой пары; 4, 5 – жилы второй (соседней) пары; 6 – экран соседней пары.

Расчет поля методом вторичных зарядов [1, 2] сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений:

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U},$$

где  $\bar{\sigma}$  - матрица-столбец плотностей вторичных зарядов;

$\bar{U}$  - матрица-столбец, потенциалов узлов расчетной модели;

$\bar{A}$  - квадратная матрица коэффициентов  $a_{ij}$ , значения которых для электродов рассчитываются по формулам:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{0j}}{r_{ij}} \cdot \Delta l_j & \forall i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{0j}}{\Delta l_j / (2e)} \cdot \Delta l_j & \forall i = j \end{cases} \quad (1)$$

где  $i$  - номер узла, в котором определяются характеристики поля;

$j$  - номер узла, в котором расположен заряд;

$r_{ij}$  - расстояние между точками  $i$  и  $j$ ;

$r_{0j}$  - расстояние от точки  $j$  до точки с нулевым потенциалом;

$\Delta l_j$  - длина отрезка образующей с центром в точке  $j$ ;

$e$  - основание натуральных логарифмов ( $e \approx 2,71828\dots$ );

$\epsilon_0$  - электрическая постоянная ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м).

В расчетной модели сплошные линии плоскопараллельных электродов разбиты на отрезки длиной  $\Delta l_j$  с центром в точке  $j$ , то есть линейные заряды, образующие плоскопараллельные тела, представляют собой полоски длиной  $\Delta l_j$ . Для узлов, относящихся к экранам, в формулу введен множитель  $k_e$ . Тогда геометрическая длина каждого участка образующей экранов пар  $\Delta l_j$  уменьшается в  $k_e$  раз.

Упрощенный оценочный расчет величин проходных емкостей, выполненный при указанных допущениях с учетом того, что диэлектриком является воздух, приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Величины собственных и проходных емкостей витых пар, пФ/м при разных значениях коэффициента поверхностной плотности экрана.

$k_e$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$
0,8	127	17,8	109	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$
0,6	126	18,0	107	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$
0,4	124	18,2	105	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-1}$

$C_{11}, C_{12}, C_{13}$  - собственные емкости потенциальной жилы, потенциальной жилы относительно парной и потенциальной жилы на экран соответственно составляют десятки и сотни пикофарад на метр.  $C_{14}, C_{15}, C_{16}$  - проходные емкости потенциальной жилы относительно жил соседней пары и потенциальной жилы относительно экрана соседней пары составляют сотые и тысячные доли пикофарада на метр длины кабеля. Они существенно отличаются от собственных емкостей и сильно зависят от коэффициента поверхностной плотности экрана.

Расчетные напряженности поля внутри экранированной витой пары достигают 5 МВ/м (так называемая область сильного поля). Напряженности поля между парами (так называемая область слабого поля) достигают 1–10 кВ/м, что в тысячи раз меньше, чем в области сильного поля. Расчетные напряженности также сильно зависят от коэффициента плотности экрана (рис. 4).

Приближенные оценки величин проходных емкостей указывают на их наличие в кабелях с проводочным экраном даже при взаимном расположении пар, указанном на рисунке 3. Если принять во

внимание то, что соседние пары в кабеле могут располагаться одна над другой, как показано на рисунке 5, расстояния между ними будут меньше, чем в предыдущей модели, взаимодействие будет выше, величины проходных емкостей увеличатся.

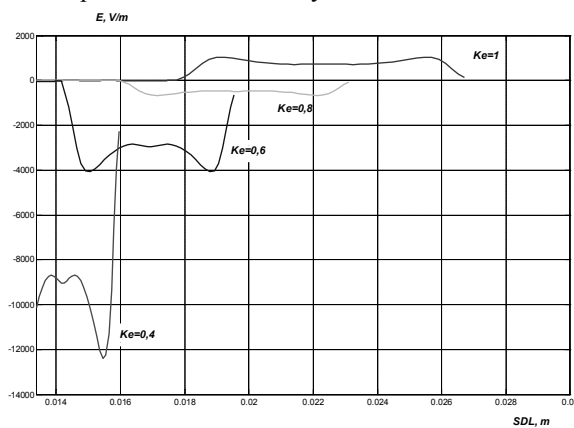


Рис. 4 - Развертки напряженности поля между экранированными витыми парами при различных коэффициентах плотности экрана.

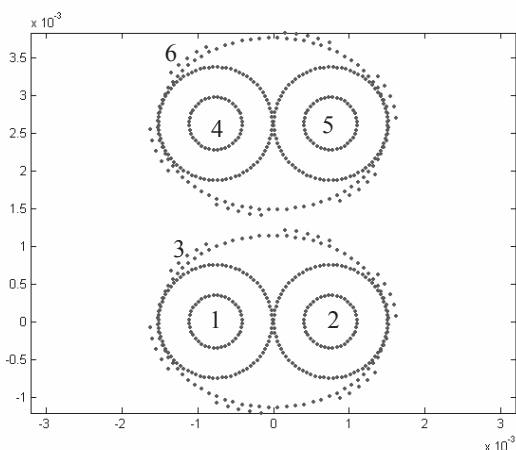


Рис. 5 - Схема расположения узлов в модели для расчета проходной емкости между экранированными витыми парами: 1,2 – жилы; 3 – экран жил; 4,5 – жилы соседней пары; 6 – экран соседней пары.

В уточненной расчетной модели при взаимном расположении пар одна над другой учтены диэлектрические проницаемости изоляции из сшитого полиэтилена и скрепляющей полиимидной пленки, наложенной под экраном. Также уточнена конструкция экрана, который представлен теперь шестью прядями проволок в каждой. Изменяя количество проволок в пряди можно менять коэффициент поверхностной плотности экрана. Для реализации расчета уточненной модели принято допущение, что для проволочных экранов в выражении (1) длина элементарного отрезка образующей  $\Delta l_j$  равна диаметру проволоки  $d_j$ .

Результаты расчета собственных и проходных емкостей уточненной модели приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Величины собственных и проходных емкостей витых пар, пФ/м в уточненной модели при разных значениях коэффициента поверхностной плотности экрана.

$k_e$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$
0,8	110	17,9	94	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	0,8
0,6	108	18,0	90	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	2,7
0,4	105	18,3	82	$0,16 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	6,4

Сравнительный анализ двух расчетных моделей (табл. 1 и табл. 2) показывает, что с внесением уточнений собственные емкости изменились незначительно, а проходные емкости увеличились на один - два порядка, что связано с уменьшением доли воздушной компоненты в трубках электрического поля, достигающих жил соседней пары, из-за уменьшения расстояния между парами.

Таким образом, расчет показывает, что даже в случае максимально близкого взаимного расположения пар, даже при малых коэффициентах плотности экрана емкости между парами, так называемые проходные емкости, на 3-5 порядков меньше так называемых собственных емкостей. Величины проходных емкостей не превышают сотых долей пикофарад на метр длины кабеля. Такие величины крайне сложно измерить. Поэтому, при измерении проходных емкостей следует пользоваться методикой совокупных измерений [5].

В качестве объектов измерений выбраны образцы контрольных кабелей КПЭТИнг 7x2x0,7, отобранные с кабельных трасс АЭС, где они находились в эксплуатации от 13 до 24 лет. Сердечники кабелей состоят из 7 витых пар, взаимное расположение которых удовлетворяет закону правильной повивной скрутки (одна пара в центре, шесть пар - в наружном повиве), то есть, максимально плотно прилегают друг к другу. Кабели имеют оболочки из негорючего поливинилхлоридного пластиката. После длительной эксплуатации кабели были подвержены дополнительному тепловому старению различной продолжительности, затем в течение одного года находились во влажном помещении. Для двух образцов была проведена серия измерений собственных и проходных емкостей, а также тангенсов углов диэлектрических потерь соответствующих изоляционных промежутков. Результаты прямых и совокупных измерений [3] представлены в виде  $C_{1-g}$  диаграммы (рис. 6).

Прямые измерения параметров межэкранного пространства проводились по схеме «одна из жил экранированной витой пары центрального повива против каждой из жил соседних пар, находящихся во внешнем повиве» (группа  $C_{1-g}$  на рисунке 6). Величины проходных емкостей оказались больше расчетных и достигли 1,8-2,3 пФ. Такой порядок величин соответствует емкости коммутационных проводов измерительного прибора. Следовательно, величина емкости межэкранного промежутка не заметна на фоне емкости измерительных проводов коммутатора.

Увеличение емкости измерения достигается применением совокупной схемы подключения. Результаты совокупных измерений параметров межэкранного пространства показаны на рисунке 6 группой  $C_{p-all}$  (жилы одной из пар против всех остальных жил). Величины емкостей этой группы на порядок больше паразитных емкостей соединения, поэтому их влияние на измеряемые величины не велико.

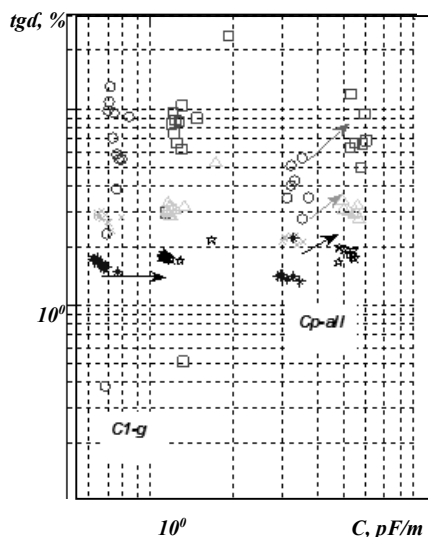


Рис. 6 -  $C$ - $tg\delta$  диаграмма образцов кабелей КПЭТИнг 7х2х0,7: «о», «х», «\*» - параметры образца № 1 на частотах 0,1 кГц, 1 кГц и 10 кГц соответственно; «□», «Δ», «\*» - параметры образца № 2 на частотах 0,1 кГц, 1 кГц и 10 кГц соответственно.

Таким образом, измерение проходных емкостей возможно осуществить только методом совокупных измерений. По их значениям, а так же, по величинам тангенсов углов диэлектрических потерь можно судить о состоянии межэкранного пространства. Тангенсы углов диэлектрических потерь в группе  $C_{p-all}$  для обоих образцов поднялись выше 1 %, что свидетельствует о наличии влаги в пространстве между парами. Однако значения  $tg\delta$  межэкранного пространства в этой группе емкостей выше у образца кабеля № 2. Можно предположить, что этот образец увлажнен сильнее. Подтверждают данное предположение признаки старения, обнаруженные на оболочке: изменение цвета, конденсация влаги на поверхности оболочки, чего не наблюдалось у образца № 1. Следовательно, через состаренную оболочку внутрь конструкции проникает влага и скапливается в межэкранном пространстве. Это явление можно обнаружить путем измерения тангенсов углов диэлектрических потерь соответствующих промежутков методом совокупных измерений.

**Выводы.** 1. При наличии в кабелях с экранированными витыми парами проволочных экранов пар существует возможность проникновения части зондирующего поля в свободное пространство между экранами. Это открывает возможность измерения параметров  $C$  и  $tg\delta$  указанного промежутка для анализа его состояния.

2. Рассчитав напряженность поля между экранированными парами и внутри них, можно сделать выводы о существенном их отличии (в тысячи раз). Соответственно, отличаются и проходные емкости между экранированными парами в сравнении с собственными емкостями пар. Вследствие малой величины проходных емкостей, прямые их измерения затруднительны, поэтому для измерения параметров  $C$  и  $tg\delta$  следует применять методику совокупных измерений.

3. Измерения проходных емкостей и тангенсов углов диэлектрических потерь соответствующих промежутков методом совокупных измерений (жилы одной из пар против всех остальных жил) позволяют сделать выводы о состоянии межэкранного пространства кабеля. Сравнительный анализ параметров двух образцов показал сильное увлажнение одного из них, оболочка которого оказалась состарена.

**Список литературы:** 1. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1-3, 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с., ил. 2. Набока Б. Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: Учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей. – Киев: ИС-ИО, 1995. – 120 с. 3. Набока Б. Г., Беспрозванных А. В., Штангей А. С. Параметры частичных емкостей как индикатор состояния контрольных кабелей АЭС // Электротехника и Электромеханика. - №3 – 2005, с. 80–82. 4. Леонов В. М., Пешков И. Б., Рязанов И. Б., Холодный С. Д. Основы кабельной техники. / – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432с. 5. Штангей А. С. Обследование многожильных кабелей методом совокупных измерений. Выбор оптимальных планов с помощью чисел обусловленности // Вестник НТУ «ХПИ», вып. 22. : НТУ «ХПИ». – 2004. – С. 117–120.

**Bibliography.** 1. Demirchyan K. S., Neyman L. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: V 3-h t. Uchebnik dlya vuzov. Tom 1-3, 4-e izd. – SPb.: Piter, 2003. – 463 p., il. 2. Naboka B. G. Raschetyi elektrostatičeskikh polej v elektroizolyatsionnoj tehnikе: Uchebnoe posobie dlya studentov elektroenergetičeskikh spetsialnostey. – Kiev: ISIO, 1995. – 120 s. 3. Naboka B. G., Besprozvannyh A. V., Shtangej A. S. Parametry chastichnyh emkostej kak indikator sostojanija kontrol'nyh kabelej AJeS. // Jelektrotehnika i Jelektromehaniка. - №3 – 2005, p. 80–82. 4. Leonov V. M., Peshkov I. B., Ryzanov I. B., Holodnyiy S. D. Osnovy kabelnoy tehniki. – M.: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2006. – 432p. 5. Shtangej A.S. Obsledovanie mnogozhilnyh kabeley metodom sovokupnyh izmereniy. Vyibor optimalnyh planov s pomoschyu chisel obuslovlennosti // Vestnik NTU «HPI», vyip. 22. : NTU «HPI». – 2004. – pp. 117–120.

Поступила (received) 04.02.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Прходные емкости в кабелях с экранированными витыми парами / Г. С. Федяй** // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 64 – 68. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**Прходные емкости в кабелях с экранированными витыми парами / А. С. Федяй** // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 64 – 68. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**Feedthrough capacitance in cables with shielded twisted pairs // Н. Fedyay**, Bulletin of NTU "KhPI". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. - No 31 (1253). – P. 64 – 68. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.

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

**Федяй Ганна Сергіївна** - кандидат технічних наук, Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний інститут», доцент кафедри «Електроізоляційна і кабельна техніка», (050) 8102733, [hanna.fedyay@gmail.com](mailto:hanna.fedyay@gmail.com)

**Федяй Анна Сергеевна** - кандидат технических наук, Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», доцент кафедры «Электроизоляционная и кабельная техника», (050) 8102733, [hanna.fedyay@gmail.com](mailto:hanna.fedyay@gmail.com)

**Fedyay Anna Sergeevna** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Docent of department "Electrical insulation and cable technique", (050) 8102733, [hanna.fedyay@gmail.com](mailto:hanna.fedyay@gmail.com)

УДК 621.311.26

**И. И. ЧЕРВОНЕНКО В. С. КУЛЕШОВ, К. В. КУЛЕШОВА****ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩИХ УЗЛОВ В «УМНЫХ» СЕТЯХ**

Проблема обеспечения надежного и бесперебойного питания потребителей, питающихся от электростанций, которые работают на возобновляемых источниках энергии, очень актуальна. В данной статье проведен анализ мирового опыта по созданию гибридных энергогенерирующих узлов, работающих на возобновляемых источниках энергии. Благодаря разработанной балансовой модели энергоузла, дана оценка возможности строительства гибридных электростанций в условиях Востока Украины, и даны рекомендации по применению такого рода источников электроснабжения в структуре «умных» сетей с распределенной генерацией.

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, ветроэлектростанция, гидроаккумулирующая электростанция, график нагрузки, умные сети, аккумулирование энергии, энергогенерирующий узел.

Проблема обеспечения надежного и бесперебойного питания потребителей, питающихся от электростанций, которые работают на возобновляемых источниках энергии, очень актуальна. В данной статье проведен анализ мирового опыта по созданию гибридных энергогенерирующих узлов, работающих на возобновляемых источниках энергии. Благодаря разработанной балансовой модели энергоузла, дана оценка возможности строительства гибридных электростанций в условиях Востока Украины, и даны рекомендации по применению такого рода источников электроснабжения в структуре «умных» сетей с распределенной генерацией.

**Ключевые слова:** солнечная электростанция, ветроэлектростанция, гидроаккумулирующая электростанция, график нагрузки, умные сети, аккумулирование энергии, энергогенерирующий узел.

Reliable and uninterrupted power supply of consumers from electric power stations on renewable energy sources, such as solar power plants and wind power plants, are the task of current interest. Common using of solar power plants and wind power plants makes it possible to solve this problem. The article analyzes the worldwide experience in the design and construction of such hybrid power plants. A lot of attention in these studies is given to accumulation of electric energy for improving the reliability of individual power consumers, who receive the energy only from hybrid power hub. In this study we are estimating the possibility for hybrid energy hubs creation in the eastern part of Ukraine with allowance of seasonal fluctuations in power generation and the influence of meteorological factors on the energy generation. The model makes it possible to determine the capacity of power plants which are the part of an energy hub and choose there optimal configuration. It was considered the possibility of integration of the energy hubs in smart networks for improving the power supply reliability as an alternative energy storage. It was proved the feasibility of solar power plants and wind power plants co-operation in the hybrid power hubs. In the further research it is necessary to determine the optimal capacity of solar power plant, wind power plant and accumulating storage power plant in usage as a part of energy hub.

**Keywords:** solar power plant, wind power plant, pumped hydro storage, load curve, smart grids, accumulating plant, energy hub.

**Введение.** На сегодняшний день многие страны разрабатывают принципиально новую модель построения и функционирования энергетической отрасли, которая основана на снижении потребления ископаемых ресурсов и переходе на возобновляемые источники энергии, такие как солнце, ветер, вода и биомасса. Это объясняется стремлением к защите окружающей среды, ограниченностью запасов и ростом цен на органические виды топлива, моральным и физическим старением объектов тепловой и ядерной энергетики и пр.

Украина не является исключением и доля электростанций работающих на возобновляемых источниках энергии постоянно увеличивается. Это касается не только гидроэлектростанций (ГЭС) но и солнечных (СЭС) и ветровых электрических станций (ВЭС). На сегодняшний день ВЭС и СЭС сосредоточены в Южных регионах на побережье Черного и Азовского морей и на Западной Украине, в основном в Закарпатской области [1-3].

Именно с целью предоставления надежного, безопасного, экономически целесообразного и экологически чистого энергоснабжения потребителей большое внимание уделяется проектированию и строительству электростанций, работающих на возобновляемых источниках, таких как СЭС, ВЭС, ГЭС и др.

Однако одним из недостатков является то, что работа таких станций сильно зависит от метеороло-

гических факторов и влияет на работу как отдельных электростанций, так и энергосистемы в целом. Поэтому с ростом установленных мощностей СЭС и ВЭС и увеличение удельного веса этих станций в общей доле генерации, возникает проблема обеспечения устойчивой работы объединенной энергетической системы (ОЭС) и покрытия требуемого графика нагрузки потребителей.

Следует отметить, что достоинством этих станций является то, что они могут строиться непосредственно возле конечного потребителя, а это в свою очередь приводит к снижению потерь на трансформацию и передачу электрической энергии, что способствует развитию «умных сетей» с распределенной генерацией.

**Анализ последних исследований и достижений.** В своем исследовании китайские ученые [4] предлагают для компенсации скачкообразного характера генерации на солнечной и ветровой электростанциях, использовать наиболее традиционную и отработанную технологию хранения энергии – гидроаккумулирующую электростанцию (ГАЭС). Такое решение позволило поддержать автономность работы гибридной микросети. Структура такого генерирующего узла показана на рис. 1.

Исследователи разработали математическую модель предложенной гибридной системы и показали принцип взаимодействия всех станций между собой и с конечным потребителем. Данная гибрид-

ная система должна обеспечить энергией выделенную группу потребителей. Результаты моделирования показывают, что прерывистый характер генерации энергии на СЭС и ВЭС может быть скомпенсирован за счет ГАЭС. Таким образом, применение ГАЭС в составе гибридных энергосистем, работающих на возобновляемых источниках энергии, позволяет обеспечить надежное и автономное энергообеспечение отдельных населенных пунктов.

В другой статье [5] рассматривается вариант использования в качестве накопителя аккумуляторные батареи. Авторами предложена компьютерная модель, описывающая работу такого гибридного комплекса. В работе рассмотрены различные методы прогнозирования генерации в зависимости от изменения метеорологических факторов и предложено определение оптимальных параметров станций в зависимости от параметров нагрузки.

В Греции на острове Икарія строится гибридная электростанция, в которую входят ВЭС и ГАЭС

[6]. По расчетам инженеров этот энергетический комплекс должен работать на выделенную нагрузку. Авторами статьи предложен алгоритм работы системы управления такого узла и дана оценка ожидаемого эффекта от работы ВЭС совместно с ГАЭС.

Еще в одной работе произведена оценка похожего проекта на острове Крит (Греция) [7]. Но при этом рассматриваются различные конфигурации гидроаккумулирующей станции. В одном варианте это ГАЭС, на которой установлены обратимые гидроагрегаты, а в другом варианте, на станции раздельно используются насосы и турбины.

Следует отметить, что во всех исследованиях рассматривается работа гибридных электростанций на выделенную нагрузку, а не как энергогенерирующий узел в структуре единой энергосистемы.

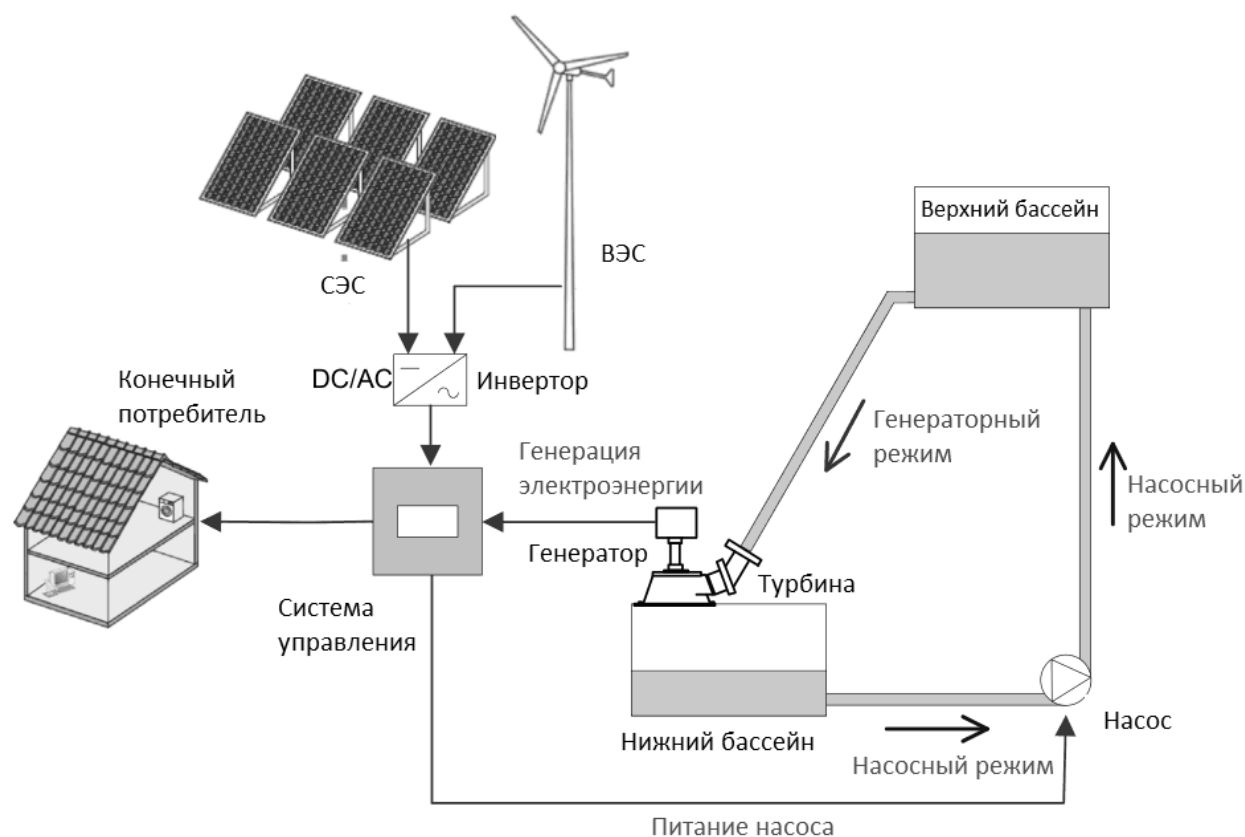


Рис. 1 – Схема гибридного генерирующего узла

**Основные материалы исследования.** Как уже было рассмотрено выше, проблема солнечных и ветряных электростанций заключается в том, что объем генерации электрической энергии существенно зависит от погодных условий. В пасмурную погоду или ночью генерация энергии на солнечных электростанциях существенно снижается, или полностью отсутствует.

Для проведения оценки возможной генерации СЭС в Харьковской области с помощью экспери-

ментальной установки был получен массив данных за год наблюдений, с выборкой за каждые 5 сек. Полученные данные позволили оценить количество солнечных и облачных дней в году, оценить степень облачности в различные сезоны.

Стабильная работа электростанций в узле и бесперебойность снабжения потребителей, является очень важным вопросом если рассматривать его в контексте развития «умных» сетей с распределенной генерацией.

Поэтому, актуальной остается проблема определения мощности СЭС и ВЭС, входящих в состав энергогенерирующего узла, с учетом мощности нагрузки, которую данный энергоузел должен обеспечить

печить энергией, и влияния изменения погодных факторов на график выработки электроэнергии.

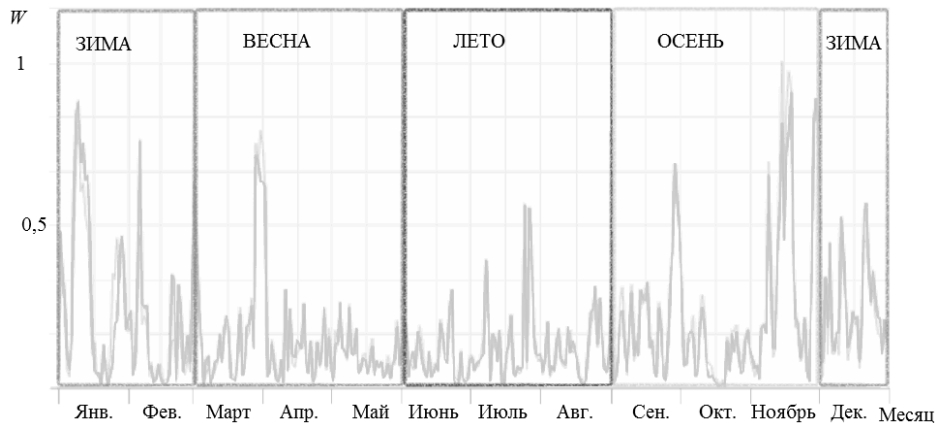


Рис. 2 – Годовой график генерации на ВЭ

Оценка объема генерируемой энергии на ВЭС была произведена аналитически при помощи формулы (1). Необходимые для расчетов значения скорости ветра были получены из интернета [8], а при анализе учитывалась только скорость больше 5 м/с.

При этом мощность ветровых установок колеблется в течение суток в зависимости от скорости и силы ветра, а сезонность оказывает меньшее влияние на их выработку (Рис. 2), в отличие от СЭС.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_r \eta_{tr} \quad (1)$$

где  $\rho = 1,22$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – скорость ветра, м/с;

$\eta_r \cdot \eta_{tr}$  – КПД генератора и преобразователем между ветроколесом и генератором;

$C_p$  – коэффициент использования ветра, зависящий от профиля лопастей и других режимных параметров, в расчетах принималось значение 0,4;

$A$  – площадь ветротурбины, м<sup>2</sup>.

Благодаря проведенному анализу данных и расчетам были построены усредненные сезонные графики генерации СЭС и ВЭС, которые в дальнейшем учитывались при составлении балансовой модели энергогенерирующего узла.

Задача сводится к отысканию таких параметров СЭС и ВЭС, при которых достигался нулевой баланс генерации и потребления (2).

$$P_{\text{нагр}} = P_{\text{ВЭС}} + P_{\text{СЭС}} \quad (2)$$

где  $P_{\text{нагр}}$  – мощность нагрузки, МВт;

$P_{\text{ВЭС}}$  – мощность, генерируемая ВЭС, МВт;

$P_{\text{СЭС}}$  – мощность, генерируемая СЭС, МВт.

При этом следует учитывать сезонные графики нагрузки для зимы, лета, весны и осени (Рис. 3). Весенний и осенний период очень похожи по своим характеристикам, поэтому мы будем рассматривать эти их совместно. Все графики показаны в относительных единицах и приведены к мощности максимальной нагрузки.

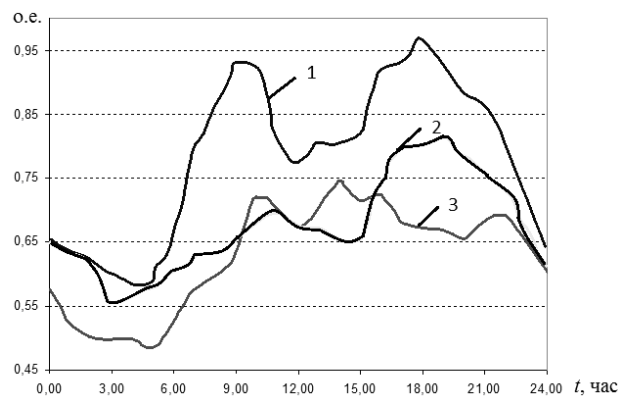


Рис. 3 – Типовые графики нагрузки: 1 – Зима; 2 – Весна, Осень; 3 – Лето

Балансовая модель энергогенерирующего узла в который входят солнечная, ветровая электростанция и заданы графики нагрузки потребителей в различные сезоны построена в программной среде MatLab. Были получены трехмерные графики баланса генерируемой и потребляемой энергии ( $P_H$ ). Установленная мощность электростанций увеличивалась за счет изменения весовых коэффициентах станций  $k_{СЭС(ВЭС)}$  (3) до тех пор, пока не был достигнут нулевой баланс мощности. Суточный трехмерный график генерации и потребления электроэнергии в зимний период показан на рис. 4. Та часть

графика, которая по оси выработки ( $W$ ) ниже нуля, свидетельствует о избытке энергии в узле.

$$P_{СЭС(ВЭС)} = k_{СЭС(ВЭС)} P_H \quad (3)$$

Из данного графика следует, что при изменении весового коэффициента ВЭС в пределах от 0 до 6,5 и весового коэффициента СЭС от 0 до 6,5, можно найти оптимальную конфигурацию, при которой потребности потребителя будут полностью покрываться этими станциями.

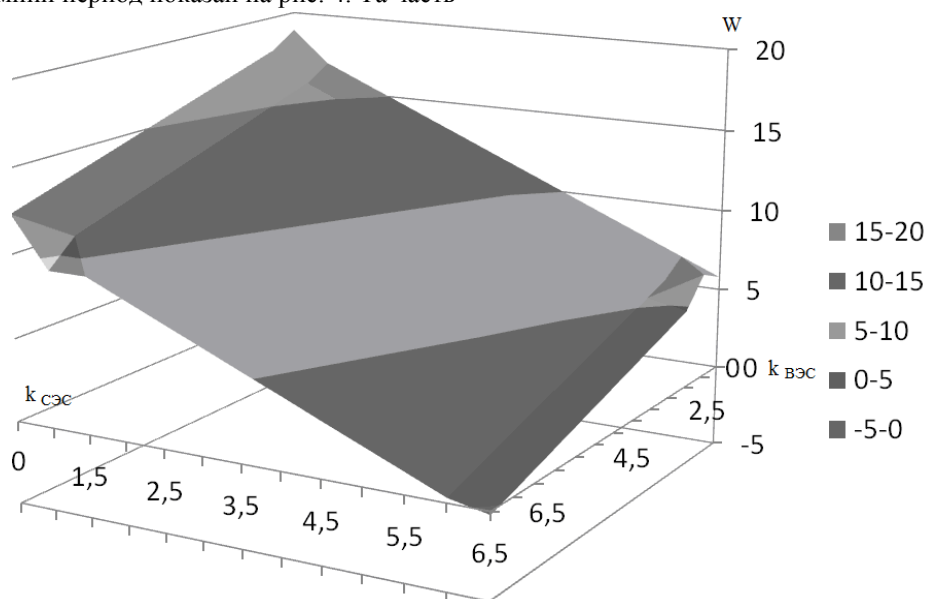


Рис. 4 – Суточный график генерации и потребления электроэнергии в зимний период

Анализируя данную модель можно прийти к выводу, что для покрытия максимумов нагрузки весовые коэффициенты могут принимать существенные значения, что повышает стоимость капиталовложений при строительстве генерирующего узла, тем самым понижая его рентабельность.

Проблема увеличения установленной мощности электростанций может быть решена за счет применения накопителей энергии. Это повысит маневренность системы: во время максимума генерации излишек энергии подпитывает накопитель, или может направляться в систему, а в период максимума нагрузок накопитель отдает часть своей запасенной энергии и поддерживает требуемый уровень мощности при недостатке генерации.

Включение генерирующих узлов с накопителями энергии в структуру «умных» сетей, позволит повысить эффективность использования генерируемой мощности, а также повысить надежность снабжения потребителей.

Это может дать возможность расширить границы устойчивости системы путем рационального распределения энергии, корректируя потребление в зависимости от доступной мощности и утвержденного индивидуального графика нагрузок составлен-

ного самим потребителем. В случае серьезного нарушения устойчивости, данная система сможет применить частотную разгрузку либо задействовать резервную мощность накопителя в зависимости от сложности системного сбоя.

Современные электроэнергетические системы, как правило, основаны на использовании централизованных электростанциях большой мощности. Сами объединенные энергосистемы пассивны, а потоки мощности направлены в одном направлении, в то время как «умные» сети активны, а так же способны приспосабливаться к двунаправленным распределениям потоков мощности.

Гибридные энергоузлы, в состав которых входят СЭС и ВЭС, будут питать распределительные низковольтные сети, в то время как крупные электростанции, будут питать систему через линии высокого и сверхвысокого напряжения. «Умные» сети способны к саморегулированию. Отдельным плюсом можно выделить способность к распределению нагрузки во время пикового спроса, что значительно может расширить возможности внедрения ВЭС и СЭС.

В существующих сетях центр осуществляет полный контроль и командно-диспетчерское управ-



ление, а в «умных» сетях центр осуществляет надзор (активная балансировка мощности и вспомогательные услуги).

#### Выводы:

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Совместное использование СЭС и ВЭС в составе гибридного энергогенерирующего узла дает возможность улучшить график генерации и покрыть необходимую нагрузку потребителя, что подтверждается зарубежными исследованиями в данном направлении.

2. В программе MatLab была разработана балансовая модель генерирующего узла в составе ВЭС и СЭС, которая учитывала характер нагрузки и генерации в различные сезоны.

3. За счет изменения мощностей электростанций относительно нагрузки, был получен график зависимости, на котором видно при каких условиях будет достигнуто полная автономия такого энергоузла.

4. Рассмотрены варианты повышения эффективности таких энергетических узлов за счет применения аккумулирующих установок и за счет интеграции таких систем в структуру «умных» сетей с распределенной генерацией.

5. При дальнейших исследованиях необходимо определить оптимальные мощности СЭС, ВЭС и аккумулирующей установки, при совместном использовании в составе энергоузла.

Список литературы: 1. <http://www.uamap.org.ua/map>. 2. Фель А. М. Концепция развития солнечных электростанций в Украине /А.М. Фель//Электромашинобудування та електрообладнання. –

2010. – №. 75. – С. 71-74. 3. Дрёмин И. В. Определение предельных мощностей солнечных электростанций в ОЭС Украины /И.В.Дрёмин//Проблеми загальної енергетики. – 2016. – №. 2. – С. 34-42. 4. Ma T. Technical feasibility study on a standalone hybrid solar-wind system with pumped hydro storage for a remote island in Hong Kong /T. Ma//Renewable energy. – 2014. – Т. 69. – С. 7-15. 5. Zhou W. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems / W. Zhou//Applied Energy. – 2010. – Т. 87. – №. 2. – С. 380-389. 6. Papaefthymiou S. V. A wind-hydro-pumped storage station leading to high RES penetration in the autonomous island system of Icaria /S. V. Papaefthymiou//IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2010. – Т. 1. – №. 3. – С. 163-172. 7. Anagnostopoulos J. S. Study of hybrid wind-hydro power plants operation and performance in the autonomous electricity system of Crete Island /J. S Anagnostopoulos, D. E. Papantonis//Recent Advances in Energy, Environment and Economic Development. 8. [http://rp5.ru/Погода\\_в\\_Харькове\\_\(аэропорт\)](http://rp5.ru/Погода_в_Харькове_(аэропорт))

References: 1. <http://www.uamap.org.ua/map>. 2. Fel' A. M. *Konceptija razvittija solnechnyh jelektrostantsij v Ukraine* [Elektromashinobuduvannja ta elektroobladnannja]. – 2010. – №. 75. – С. 71-74. 3. Drijomin I. V. *Opredelenie predel'nyh moshhnostej solnechnyh jelektrostantsij v OJeS Ukrainy* [Problemi zagal'noї energetiki]. – 2016. – №. 2. – С. 34-42. 4. Ma T. *Technical feasibility study on a standalone hybrid solar-wind system with pumped hydro storage for a remote island in Hong Kong* [Renewable energy]. – 2014. – Т. 69. – С. 7-15. 5. Zhou W. *Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems* [Applied Energy]. – 2010. – Т. 87. – №. 2. – С. 380-389. 6. Papaefthymiou S. V. *A wind-hydro-pumped storage station leading to high RES penetration in the autonomous island system of Icaria* [IEEE Transactions on Sustainable Energy]. – 2010. – Т. 1. – №. 3. – С. 163-172. 7. Anagnostopoulos, J. S., and D. E. Papantonis. *Study of hybrid wind-hydro power plants operation and performance in the autonomous electricity system of Crete Island* [Recent Advances in Energy, Environment and Economic Development]. 8. [http://rp5.ru/Погода\\_в\\_Харькове\\_\(аэропорт\)](http://rp5.ru/Погода_в_Харькове_(аэропорт))

Поступила (received) 16.10.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Використання гібридних енергогенеруючих вузлів в «розумних» мережах/ І. І. Червоненко В. С. Кулешов, К. В. Кулешова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 69 – 73. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Использование гибридных энергогенерирующих узлов в «умных» сетях/ И. И. Червоненко В. С. Кулешов, К. В. Кулешова, // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 69 – 73. Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Using hybrid power generating units in «smart» networks / I. I. Chervonenko, K. V. Kuleshova, V. S. Kuleshov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1253). – P. 69 – 73. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.**

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

**Кулешов Владислав Сергеевич** – студент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт».

**Vladislav S. Kuleshov** – student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», (099) 310-99-50, e-mail: [k.v.serheevich@gmail.com](mailto:k.v.serheevich@gmail.com).

**Кулешова Кристина Владимировна** – студент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт».

**Kristina V. Kuleshova** – student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», (099) 310-99-50, e-mail: [kuleshova.kv@gmail.com](mailto:kuleshova.kv@gmail.com).

**Червоненко Иван Игоревич** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры электрических станций, тел. (057) 707-62-76, e-mail: [iichervonenko@gmail.com](mailto:iichervonenko@gmail.com).

**Ivan I. Chervonenko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Lecturer at the Department of Electric Power Stations, (057) 707-62-76, e-mail: [iichervonenko@gmail.com](mailto:iichervonenko@gmail.com).

УДК 679.7:678:544

Е.В. ЧУЛЕЕВА, В.М. ЗОЛОТАРЕВ

## ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРА ЭТИЛЕНА С ВИНИЛАЦЕТАТОМ. ВЛИЯНИЕ МАГНЕЗИТОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ГОРЮЧЕСТИ

В зв'язку з підвищеною увагою що до пожежної безпеки кабелів виникла потреба створення нових полімерних матеріалів, які не підтримують горіння. Це матеріали з якнайменшою горючістю. З метою розробки складу полімерних композицій, які забезпечують вищезгадані властивості визначали вплив магnezитів на показники горючості полімерних композицій на основі кополімеру етилену з винилацетатом. Використовували метод диференційної скануючої калориметрії одночасно з моделлю вільної кінетики для кожного складу полімерних композицій. Кінетичні характеристики дозволяють визначити склад з найкращими показниками горючості. Метод є апаратним та забезпечує високу точність та простоту використання у порівнянні з існуючими наразі методами.

**Ключові слова:** кополімер етилену з винилацетатом, магnezит, горючість, полімерна композиція, кінетика.

В связи с повышенным вниманием по пожарной безопасности требуется создание новых не поддерживающих горение полимерных материалов для кабельной промышленности. Это материалы с как можно меньшей горючестью. Для разработки составов полимерных композиций для кабельной промышленности с вышеупомянутыми свойствами определяли влияние магnezитов на показатели горючести полимерных композиций на основе сополимера этилена с винилацетатом. Использовали метод дифференциальной сканирующей калориметрии совместно с моделью свободной кинетики для каждого из составов полимерной композиции. На основании кинетических характеристик определяли состав с наилучшими показателями горючести. Метод относится к аппаратным методам исследования и обеспечивает высокую точность и простоту использования по сравнению с известными и применяемыми в настоящее время методами.

**Ключевые слова:** сополимер этилена с винилацетатом, магnezит, горючесть, полимерная композиция, кинетика.

In connection with increased attention to fire safety, it is required to create new flame-retardant polymer materials for the cable industry. These are materials with as little combustibility as possible. Used the flame retardants fillers allows to reduce the combustibility. The study tested the inorganic flame retardants in particular magnesites. The study determined the influence of magnesites on the combustibility of the ethylene-vinyl acetate copolymer compositions to obtain HFFR polymer compositions for the cable industry. We used the differential scanning calorimetry method in conjunction with the free kinetics model for each of the formulation of the polymer composition. The study carried out at a temperature from 20 °C to 600 °C and different rates of temperature increase of 50 °C/min, 75 °C/min, 100 °C/min. Based on the kinetic characteristics, the composition with the best HFFR properties we determined, for which the dependence of the conversion degree on the exposure time to an elevated temperature close to the combustion temperature of the polymer compositions we studied. We constructed the graphic dependencies of these characteristics at a temperature of 450 °C. By determining the exposure time and the conversion degree each of the compositions, we can select a polymer composition with the most suitable properties for each specific case, providing a sufficient level of fire safety. The method refers to hardware methods of investigation and provides high accuracy and ease of use in comparison with known and currently used methods.

**Keywords:** ethylene-vinyl acetate copolymer, magnesites, combustibility, polymeric composition, kinetic studies

**Введение.** Повышению требований пожарной безопасности к полимерным композициям для изготовления кабельной продукции придается все большее значение из-за возрастающего применения последних в самых различных областях техники и народного хозяйства и ужесточающимися требованиями к пожарной безопасности в строительстве, энергетической отрасли, атомной энергетике, железнодорожном транспорте [1–4].

Одним из способов снижения горючести полимерных материалов на основе полиолефинов является введение в полимерную композицию наполнителей-антипиренов, однако, данные по влиянию на процесс горения полимерных композиций и зависимость его от природы, концентрации вводимых наполнителей, их дисперсности, наличие функциональных групп отсутствуют. Применение получили неорганические наполнители-антипирены в частности магnezиты. Эти материалы не только увеличивают огнестойкость за счет поглощения большого количества тепла, но и нейтрализуют кислые газы, что приводит к снижению дымообразования [5–7].

Нагревание полимерных материалов до температуры, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций окисления за-

канчивается возникновением тления. Тление – беспламенное горение твердого материала при сравнительно низких температурах (400–600) °C, часто сопровождающееся выделением дыма.

Эти процессы целесообразно исследовать при разработке и оценке пожарной опасности полимерных материалов для кабельной продукции.

**Целью** исследований являлось изучение влияния магnezитов на показатели горючести полимерных композиций на основе сополимера этилена с винилацетатом.

**Основные результаты.** При проведении исследований использовали сополимеры этилена с винилацетатом (СЭВ), характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики СЭВ

Наименование показателя	СЭВ 1	СЭВ 2
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	939	951
Показатель текучести расплава, 2,16 кг, г/10 мин	2,5	5
Содержание винилацетата, %	18	28

В качестве наполнителя-антипирена использо-

вали магнезит, характеристики которого приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Характеристики наполнителя-антипирена

Наименование показателя	Mg <sub>5</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O; Mg <sub>3</sub> Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>
<b>Массовая доля, %</b>	
Mg(OH) <sub>2</sub>	98,96
SiO <sub>2</sub>	0,67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04
Na <sub>2</sub> O	< 0,05
<b>Медианный диаметр частиц, мкм</b>	
– Средний (D <sub>50</sub> )	1,4
– Максимальный (D <sub>98</sub> )	8,35
– Минимальный (D <sub>10</sub> )	1,02

Образцы полимерных композиций на основе СЭВ с различным содержанием наполнителя-антипирена изготавливали методом вальцевания при температуре (170 ± 5) °С в течении 7–10 мин. Вальцы имеют фрикцию 1,5.

Состав полимерных композиций приведен в табл. 3.

Таблица 3 – Состав полимерных композиций

Полимерная композиция	Компоненты, %		
	СЭВ 1	СЭВ 2	Mg <sub>5</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O; Mg <sub>3</sub> Ca(CO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>
1а	60		40
2а		60	40
1в	50		50
2в		50	50
1с	40		60
2с		40	60

Тепловые, температурные и кинетические характеристики определяли по полученным данным на приборе термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей колориметрии TGA/DSC 1/1100 SF компании METTLER TOLEDO при температуре от 20 °С до 650 °С и скорости нагрева (β) 50 °С/мин, 75 °С/мин и 100 °С/мин.

Кинетические расчеты проводились по модели свободной кинетики [8–10]. Модель свободной кинетики основана на зависимости температуры и степени превращения. Каждое превращение дает расчетное значение энергии активации. Скорость реакции при фиксированной степени превращения зависит только от температуры. Используется температурная функция Аррениуса.

Для расчёта использовали анализ трех динамических температурных кривых для каждой полимерной композиции (рис.1). Использовали динамические, изотермические и комбинированные температурные программы.

Обработка кинетических экспериментов основана на теоретическом уравнении С. Вязовкина:

$$\frac{d\alpha}{dt} = ke^{-E/RT} f(\alpha)$$

где,  $\frac{d\alpha}{dt}$  – скорость реакции, с<sup>-1</sup>

$k$  – константа скорости;

$E$  – энергия активации, Дж/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная,

Дж/(моль×К);

$T$  – температура, К;

$\alpha$  – степень превращения, %.

Энергия активации  $E(\alpha)$  постоянна для определенной степени превращения (изоконверсионный метод).

Скорость химической реакции зависит от степени превращения ( $\alpha$ ), температуры ( $T$ ) и времени ( $t$ ). Скорость реакции зависит от степени превращения  $f(\alpha)$ . Для каждого процесса скорость своя и определяется экспериментально.

На основании полученных DSC с использованием вышеуказанных программ получаем графические данные зависимости энергии активации  $E(\alpha)$  от степени превращения (в нашем случае степени сгорания); зависимость степени превращения ( $\alpha$ ) от времени испытания ( $t$ ) при фиксированной температуре ( $T$ ) и зависимость времени превращения ( $t$ ) от температуры при фиксированной степени превращения ( $\alpha$ ) (рис. 1).

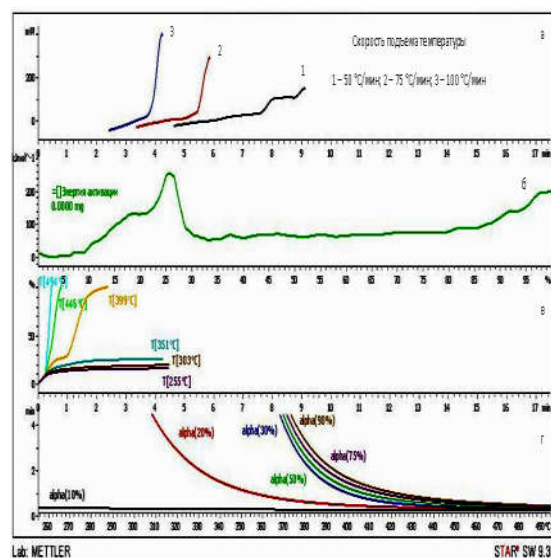


Рис. 1 – Тепловые, температурные и кинетические характеристики : а – зависимость теплового потока от времени испытания; б – зависимость энергии активации от степени превращения; в – зависимость степени превращения от времени испытания; г – зависимость времени превращения от температуры

Для определения влияния ингредиентов полимерных композиций на кинетические характеристики строили графики зависимости времени превращения от температуры при постоянной степени превращения ( $\alpha = 75\%$ ). Результаты представлены на рис. 2, 3.

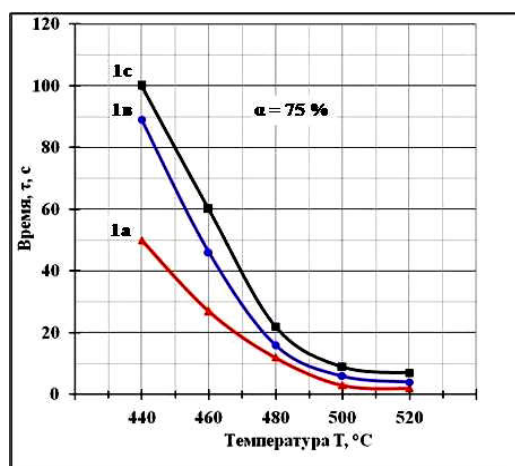


Рис. 2 – Зависимость времени превращения от температуры для полимерных композиций 1a, 1b, 1c

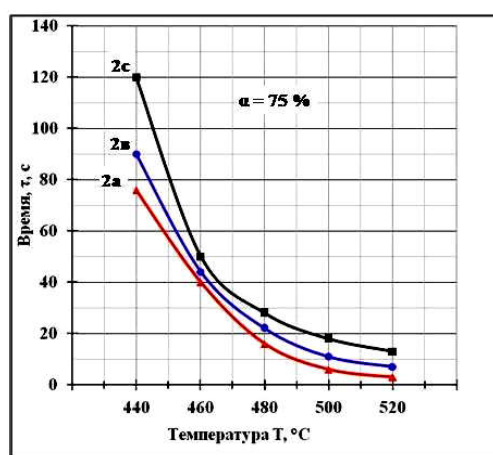


Рис. 3 – Зависимость времени превращения от температуры для полимерных композиций 2a, 2b, 2c

Из анализа полученных данных следует, что кинетические характеристики полимерных композиций существенно зависят от свойств СЭВ 1 и СЭВ 2.

Время превращения снижается при воздействии повышенных температур. При этом в области температур близких к температурам сгорания (450 °C) время превращения выше для полимерной композиции на основе СЭВ 2. С повышением температуры до 520 °C время превращения снижается (рис. 2, 3).

Для полимерных композиций на основе СЭВ 1 наблюдается аналогичная зависимость. Однако время превращения имеет меньшее значение, чем для полимерных композиций на основе СЭВ 2.

Изучали зависимость степени превращения от времени воздействия повышенной температуры близкой к температуре сгорания полимерных композиций.

Для этого строили графические зависимости этих характеристик при температуре 450 °C (рис. 4, 5).

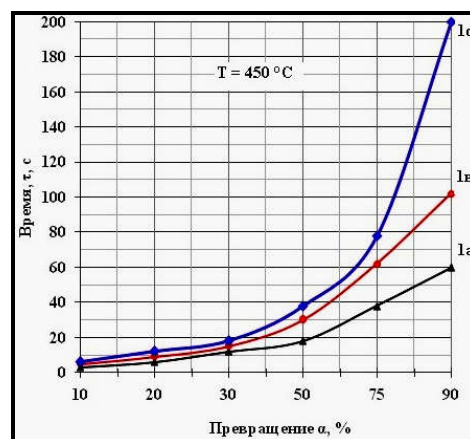


Рис. 4 – Зависимость степени превращения от времени воздействия температуры для композиций 1a, 1b, 1c

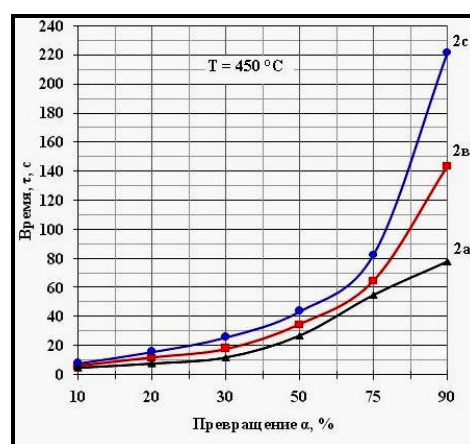


Рис. 5 – Зависимость степени превращения от времени воздействия температуры для композиций 2a, 2b, 2c

Из представленных данных следует, что степень превращения  $\alpha$  возрастает с увеличением времени воздействия повышенной температуры. При этом время воздействия необходимо значительно увеличивать для полимерных композиций на основе СЭВ 2 (рис. 4, 5).

**Вывод.** Полученные результаты исследований показывают, что лучшие кинетические характеристики получены для полимерных композиций на основе СЭВ 2 (с большим содержанием винилацетата и большим показателем текучести расплава) и магнетитов в качестве наполнителя-антипирена.

#### Список литературы

1. ДСТУ EN 50363-7:2010 Матеріали для ізоляції, оболонок і зовнішніх покривів низьконапружних силових кабелів. Частина 7. Безгалогенні термопластичні ізоляційні композиції (EN 50363-7:2005, IDT).
2. ДСТУ EN 50363-5:2010 Матеріали для ізоляції, оболонок і зовнішніх покривів низьконапружних силових кабелів. Частина 5. Безгалогенні вулканізовані ізоляційні композиції (EN 50363-5:2005, IDT).
3. ДСТУ EN 50363-6:2010 Матеріали для ізоляції, оболонок і зовнішніх покривів низьконапружних силових кабелів. Частина 6. Безгалогенні вулканізовані композиції оболонок (EN 50363-6:2005, IDT).
4. Пешков И.Б. Материалы кабельного производства / И.Б. Пешков – М.: Машиностроение, 2013. – 456 с.
5. Тирелли Диего. Антипирены для композитов / Диего Тирелли // The Chemical Journal. – 2013. – № 1-2. – С. 42-45.
6. Обзор минеральных антипиренов-гидроксидов для безгалогенных кабельных композиций // Кабель-news. – 2009. – № 8. – С. 41-43.
7. Михайлин Ю.А. Показа-

тели огнестойкости полимерных материалов и методы их определения / Ю.А. Михайлин // Полимерные материалы – 2011. – № 7. – С. 26–31. 8. Vyazovkin, S, Wight, C.A., Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data. *Thermochim. Acta*, 1999, 340-341: p. 53-68. 9. Varankina G.S., Vysotskii A.V. Effective low toxic aluminosilicate fillers for phenol formaldehyde adhesives for plywood and particleboard. / *Adhesives in woodworking Industry // Zvolen.*: 1997. c. 114-120. 10. Vyazovkin S. Evaluation of activation energy of thermally stimulated solid-state reactions under arbitrary variation of temperature // *Journal of Computational Chemistry*. 1997. Vol. 18. № 3. P. 393-402.

## References (transliterated)

1. DSTU EN 50363-7:2010 Materialy dlya izolyatsiyi, obolonok i zovnishnikh pokryviv nyz'konapruznykh sylovykh kabeliv. Chastyna 7. Bez-halohenni termoplastychni izolyatsiyi kompozytsiyi [Insulating, sheathing and covering materials for low voltage energy cables. Part 7: Halogen-free, thermoplastic insulating compounds (EN 50363-7:2005, IDT)]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2013, p. 4. 2. DSTU EN 50363-5:2010 Materialy dlya izolyatsiyi, obolonok i zovnishnikh pokryviv nyz'konapruznykh sylovykh kabeliv. Chastyna 5. Bez-halohenni vulkanizovani izolyatsiyi kompozytsiyi [Insulating, sheathing and covering materials for low voltage energy cables. Part 5: Halogen-free, cross-linked insulating compounds (EN 50363-5:2005, IDT)]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2013, p. 4. 3. DSTU EN 50363-6:2010 Materialy dlya izolyatsiyi, obolonok i zovnishnikh pokryviv nyz'konapruznykh sylovykh kabeliv. Chastyna 6.

Bez-halohenni vulkanizovani kompozytsiyi obolonok [Insulating, sheathing and covering materials for low voltage energy cables. Part 6: Halogen-free, cross-linked sheathing compounds (EN 50363-6:2005, IDT)]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2013, p. 4. 4. Peshkov I.B. *Materialy kabel'nogo proizvodstva* [Materials cable production]. Moscow, Mashinostroyeniye, 2013. 456 p. 5. Tirelli Diyego *Antipireny dlya kompozitov* [Flame retardants for composites]. *The Chemical Journal*. 2013, no. 1-2, pp. 42–45. 6. *Obzor mineral'nykh antipirenov-gidroksidov dlya bezhalogennykh kabel'nykh kompozitsiy* [Overview mineral flame retardants, halogen-free cable for hydroxide compositions]. *Kabel'-news.*, 2009, no. 8, pp. 41-43. 7. Mikhaylin YU.A. *Pokazateli ognestoykosti polimernykh materialov i metody ikh opredeleniy*. [Performance of fire resistance of polymeric materials and methods of their determination]. *Polimernyye materialy – 2011*, no. 7, pp. 26–31. 8. Vyazovkin, S, Wight, C.A., Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data. *Thermochim. Acta*, 1999, no. 340-341, pp. 53-68. 9. Varankina G.S., Vysotskii A.V. Effective low toxic aluminosilicate fillers for phenol formaldehyde adhesives for plywood and particleboard. *Adhesives in woodworking Industry. Zvolen.*: 1997, pp. 114-120. 10. Vyazovkin S. Evaluation of activation energy of thermally stimulated solid-state reactions under arbitrary variation of temperature. *Journal of Computational Chemistry*. 1997, Vol. 18, no. 3, pp. 393-402.

Посмунна (received) 27.11.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Полимерні композиції на основі кополімеру етилену з вінілацетатом. Вплив магнетитів на показники горючості / Чулєєва О. В., Золотарьов В. М.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2017. - No 31 (1253). – С. 74 – 77. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**Полимерные композиции на основе сополимера этилена с винилацетатом. Влияние магнетитов на показатели горючести / Чулєєва Е. В., Золотарев В. М.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2017. - No 31 (1253). – С. 74 – 77. Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**Polymer compositions based ethylene vinyl acetate copolymer. Influence magnetite on the combustibility performance / Chulieieva O.V., Zolotaryov V.M.** // Bulletin of NTU «KhPI». Subject issue: Energy: reliability and energy efficiency. Kharkov: NTU «KhPI». - 2017. - No 31 (1253). – P. 74 – 77. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.

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

**Чулєєва Олена Володимирівна** – кандидат технічних наук, головний спеціаліст з полімерних матеріалів науково-технічного центру приватного акціонерного товариства «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: (057) 754-53-12; e-mail: echuleeva@mail.ru.

**Чулєєва Елена Владимировна** – кандидат технических наук, главный специалист по полимерным материалам научно-технического центра приватного акционерного общества «ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ», г. Харьков; тел.: (57) 754-53-12; e-mail: echuleeva@mail.ru.

**Olena Chulieieva** – Candidate of Engineering Sciences Chief specialist for Polymeric Materials of the Science and Technology Center of Private Joint Stock Company YUZH CABLE WORKS, Kharkiv; tel.: (057) 754-53-12; e-mail: echuleeva@mail.ru.

**Золотарьов Володимир Михайлович** – доктор технічних наук, професор, генеральний директор приватного акціонерного товариства «ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків; тел.: (0572) 94-68-30; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

**Золотарев Владимир Михайлович** – доктор технических наук, профессор, генеральный директор приватного акционерного общества «ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ», г. Харьков; тел.: (0572) 94-68-30; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua.

**Volodymyr Zolotaryov** – Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Director General of Private Joint Stock Company YUZH CABLE WORKS, Kharkiv; tel.: (0572) 94-68-30, e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

УДК 621.316

**С.Ю. ШЕВЧЕНКО, Д.А. ДАНИЛЬЧЕНКО, А. М. РАВЛИК****АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОРАЖАЕМОСТИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРЯМЫМИ УДАРАМИ МОЛНИИ**

Використовуючи другу теорему подібності, отримані критерії подібності, використання яких дозволить найбільш адекватно побудувати фізичну модель лінії електропередавання, що вражається прямими ударами блискавки. Визначено фактори, які впливають на ураженість повітряних ліній прямими ударами блискавки. Розглянуто приклад застосування другої теореми подібності для повітряних ліній середніх класів напруги. За проведеними розрахунками побудована модель повітряної лінії електропередачі з використанням генератора імпульсного напруга 2,4 МВ для імітації прямого удару блискавки.

**Ключові слова:** друга теорема подібності, критерії подібності, аналіз розмірності, повітряна лінія електропередавання, прямий удар блискавки

Используя вторую теорему подобия, получены критерии подобия, использование которых позволит наиболее адекватно построить физическую модель линии электропередачи, поражаемой прямыми ударами молнии. Определены факторы, влияющие на поражаемость воздушных линий прямыми ударами молнии. Рассмотрен пример применения второй теоремы подобия для воздушных линий средних классов напряжения. По проведенным расчетам построена модель воздушной линии электропередачи с использованием генератора импульсного напряжения 2,4 МВ для имитации прямого удара молнии.

**Ключевые слова:** вторая теорема подобия, критерии подобия, анализ размерности, воздушная линия электропередачи, прямой удар молнии.

Using the second theorem of similarity obtained by the similarity criteria, the use of which will most adequately build a physical model of the transmission power line of affected direct lightning strike. Factors influencing the susceptibility of overhead lines to direct lightning strikes were identified. Analysis of the dimensions of the factors influencing the susceptibility of overhead lines direct lightning strike was made. Installed are independent each other parameters. Choose the most optimal system is the LMTI units. An example of the application of the second similarity theorem for overhead lines voltage average classes. Calculated similarity criteria to create a physical model for a pilot study to determine the probability of hitting overhead transmission line direct lightning strike. The adequacy of the experimental models and the possibility of the creation of the physical model in the real world. According to the calculations a model of an overhead transmission line using a generator of pulsed voltage of 2.4 MV to simulate the direct lightning strike.

**Keywords:** second theorem of similarity, similarity criteria, analysis of the dimensions, overhead lines, direct lightning strike.

**Введение.** Подобие физических процессов и систем широко используется в технике для исследования методом моделирования. В тех случаях, когда математическое решение задачи затруднено, а то и попросту невозможно, вполне естественным является обращение к экспериментальному исследованию на моделях с последующим перерасчетом полученных результатов на натуру, которая явилась прототипом модели.

Исследование на моделях позволяет ускорить или замедлить процессы, которые в натуральных условиях развиваются со скоростями, затрудняющими наблюдение за ними. При проведении эксперимента непосредственно на натуре почти всегда приходится отказываться от активного поиска оптимальных конструктивных решений, т.к. это связано со значительными денежными затратами, а не редко и просто невозможно.

Теория моделирования базируется на принципах, вытекающих из теории подобия [1]. Эти принципы заключаются в соблюдении условий, которые определяют соотношения между параметрами модели и натуре, а также правила пересчета исследуемых величин с модели на натуру и обратно. Однако, известно, что ни одна модель не может с абсолютной полнотой воспроизвести изучаемый оригинал – для этого должно быть полное их тождество. Поэтому при моделировании стараются соблюсти в модели по крайней мере те характеристики натуре, которые являются наиболее существенными в общей картине физического процесса, обеспечивая заданную точность результатов.

При изучении вопросов поражаемости воздушных линий электропередач молнией, важно уделить внимание не только математическим, но и физическим моделям, которые позволяют провести экспериментальные исследования поражаемости на высоковольтном стенде [2-4].

При проведении экспериментальных исследований важно обосновать адекватность экспериментальной модели [5]. Для решения данной задачи мы воспользовались второй теоремой подобия.

**Анализ последних исследований и достижений.** Вторая теорема подобия, чаще встречающаяся под названием  $\pi$ -теоремы, формулируется следующим образом: всякое полное уравнение физического процесса, записанное в определенной системе единиц, может быть представлено функциональной зависимостью между критериями подобия, полученными из участвующих в процессе параметров.

Эта теорема утверждает, что полное уравнение физического процесса, записанное в определенной системе единиц, может быть представлено зависимостью между критериями подобия, т.е. зависимостью, связывающей безразмерные величины, определенным образом полученные из участвующих в процессе параметров. Так же, как и первая, вторая теорема подобия основывается на предположении, что факт подобия между процессами известен, и устанавливает число критериев подобия, а также существование однозначной зависимости между ними. При этом выражения для критериев подобия могут быть получены, если известен состав параметров (факторов), участвующих в рассматриваемом

мом процессе, но неизвестно его математическое описание. Теорема эта, однако, также как и первая, не указывает способов выявления подобия между сопоставляемыми процессами и способов реализации подобия при построении моделей.

Вторая теорема устанавливает возможность представления интеграла дифференциального уравнения физического процесса не как функции параметров процесса и системы, в которой протекают эти процессы, а как функция соответствующим образом построенных некоторых безразмерных величин — критериев подобия. Если исходное дифференциальное уравнение проинтегрировано, то функциональные связи между критериями подобия будут однозначно определены в соответствии с теми допущениями, которые были приняты при составлении и интегрировании данного уравнения. Если же дифференциальное уравнение отсутствовало или не интегрировалось, то вид функциональных связей между критериями подобия не будет выявлен. Вторая теорема основывается на исследованиях Букингема, Федермана и Эренфест-Афанасьевой. Возможность представления интеграла как функции от критериев подобия, найденных из дифференциального уравнения, была строго доказана для частного случая Букингом. В более общем виде это положение как математическая теорема было доказано Федерманом. Эренфест-Афанасьева привела доказательство в общем виде, показав условия, при которых интеграл можно представить как функцию критериев подобия. Одновременно было показано, что из соотношений, указывающих на однородность уравнения, связывающего физические величины (одинаковая размерность всех членов уравнения), и из возможности получения безразмерных соотношений после деления этого уравнения на любой из его членов следует важный вывод о существовании определенных соотношений между размерностями физических параметров. Эренфест-Афанасьевой было показано, что критерии подобия можно найти при отсутствии дифференциального уравнения процесса на основе анализа размерностей физических величин, участвующих в этом процессе. Эта возможность была сформулирована и строго доказана в виде теоремы, названной  $\pi$ -теоремой, поскольку упомянутые выше безразмерные параметры (критерии подобия) обозначались буквой  $\pi$ .

**Цель работы:** обоснование адекватности экспериментальной модели путем получения критериев подобия для построения экспериментального поля по исследованию поражаемости воздушных линий электропередачи прямыми ударами молнии.

**Постановка задачи:** При обосновании адекватности экспериментальной модели для исследования поражаемости воздушных линий электропередачи прямыми ударами молнии возникают сложности, связанные с учетом факторов, влияющих на поражаемость воздушных линий. Для решения этой проблемы целесообразно использовать вторую теорему подобия, позволяющую корректным выбором

факторов получить достоверные критерии подобия исследуемого физического процесса.

**Методы исследования.** Три теоремы подобия составляют главную основу теории подобия. Вот краткое содержание изложенной теории подобия: 1) Подобные явления протекают в геометрически подобных системах и описываются буквально одинаковыми уравнениями связи. Эти уравнения должны быть безусловно или условно однородными. 2) Условно однородными физические уравнения делаются присоединением к ним «обуславливающих равенств», которые устанавливают равенство единице индикаторов подобия, получающихся из уравнений, или, что то же, одинаковость для подобных явлений критерием подобия. 3) Однородные уравнения могут быть представлены как функции степенных комплексов (критериев) и симплексов. Такие «критериальные» уравнения численно одинаковы для всей группы подобных явлений. 4) Подобны те явления, уравнение связи которых буквенно одинаковы и условия однозначности которых подобны, т. е. у которых одноименные моноваленты (величины, входящие в условия однозначности) находятся в численно постоянном отношении, а одноименные моновалентные (определяющие) критерии одинаковы. Теория подобия дает, следовательно, общие методические указания, как поступать в каждом отдельном случае при анализе уравнений, описывающих явление, при постановке и обработке данных опыта над ним и при распространении результатов опыта на другие явления. Если же дана натура и исследовать ее хотят на модели, то теория подобия содержит методические указания по расчету и построению модели, подобной натуре.

Основные методические указания о применении теории подобия к опыту, будь то физическое экспериментирование или техническое моделирование, состоит в следующем. При исследовании явления надо установить для него уравнения связи, дающие взаимную связь физических величин, участвующих в явлении. Эти уравнения должны быть формулированы для того частного случая, который является объектом исследования. Присоединение к ним условий однозначности делает исследование определенным и позволяет применить теорию подобия.

Поэтому во всех случаях, когда уравнения связи могут быть найдены, метод анализа уравнений есть единственно правильный путь применения теории подобия и только тогда, когда установить математическую зависимость между величинами, характеризующими явление, не удастся, надлежит обратиться к методу анализа размерности. Этот путь менее надежен и поэтому результат его необходимо проверять на опыте. Им не следует пренебрегать, так как во многих случаях анализ размерности дает при обработке опытов ценные выводы.

В настоящее время теория подобия имеет следующие направления [1]. Самым ранним направлением является приложение теории подобия к изучению разнообразных технических сооружений и мо-

делей. Моделирование стало мощным средством для обнаружения различных недостатков, имеющих в следующих технических устройствах, и для изыскания путей к их устранению. Далее моделирование уже стало широко применяться для проверки вновь конструируемых объектов, так что до их выполнения, в процессе проектирования, моделирование позволяет совершенствовать новые, еще не опробованные на практике конструкции.

Теория подобия стала научной основой обобщения данных физико-технических испытаний, своего рода теорией эксперимента, указывающей во всех тех случаях, когда решение дифференциальных уравнений физики наталкивается на трудности, путь к такой постановке опытов, что их результаты могут быть распространены на всю область изучаемых явлений. В последнее время теория подобия не только использует уравнения физики для обобщения опытных данных, но и, наоборот, при выводе дифференциальных уравнений она дает указания, с одной стороны, о введении в уравнения критериев подобия и безразмерных переменных и, с другой стороны, об использовании обобщения методами теории подобия опытных данных, являющихся исходными для составления уравнений.

Получение критериев подобия методом анализа размерностей на основании описания физического процесса. В общем случае зависимость, учитывающая все связи между параметрами процесса и элементов системы, в которой этот процесс протекает, может быть записана в виде

$$f(P_1, \dots, P_i, \dots, P_k, \dots, P_s, \dots, P_m) = 0, \quad (1)$$

где  $P_1, \dots, P_m$  - параметры, характеризующие исследуемый процесс.

Уравнение (1) - полное, а, следовательно, и однородное, поэтому все входящие в него параметры можно выразить в относительных единицах, т.е.

в долях от некоторых выбранных величин  $P_{01}, \dots, P_{0m}$  (1) можно записать следующим образом:

$$f\left(\frac{P_1}{P_{01}}, \dots, \frac{P_i}{P_{0i}}, \dots, \frac{P_k}{P_{0k}}, \frac{P_{k+1}}{P_{0k+1}}, \dots, \frac{P_s}{P_{0s}}, \dots, \frac{P_m}{P_{0m}}\right) = 0 \quad (2)$$

Однако не все величины  $P_{01}, P_{02}, \dots, P_{0m}$  можно выбирать произвольно. Например, произвольно выбрав величины, измеряющие ток и напряжение, нельзя уже произвольно выбрать величину, измеряющую сопротивление или мощность. Можно установить количество величин, выбираемых из общего множества величин  $P_{01}, P_{02}, \dots, P_{0m}$  произвольно, и найти способ выбора остальных, рассмотрев систему единиц, в которой записано уравнение (2), поскольку формулы размерностей воспроизведут зависимость между физическими величинами.

Пусть в выбранной системе единиц имеется  $k = q$  основных единиц измерения. Обозначая их через  $a, b, \dots, q$ , запишем выражение единиц измере-

ния всех участвующих, т.е. их формулы размерностей:

$$\left. \begin{aligned} [p_1] &= [a^{\alpha_1} b^{\beta_1} \dots q^{\xi_1}] = [p_{01}]; \\ &\dots \\ [p_i] &= [a^{\alpha_i} b^{\beta_i} \dots q^{\xi_i}] = [p_{0i}]; \\ &\dots \\ [p_k] &= [a^{\alpha_k} b^{\beta_k} \dots q^{\xi_k}] = [p_{0k}]; \\ &\dots \\ [p_s] &= [a^{\alpha_s} b^{\beta_s} \dots q^{\xi_s}] = [p_{0s}]; \\ &\dots \\ [p_m] &= [a^{\alpha_m} b^{\beta_m} \dots q^{\xi_m}] = [p_{0m}], \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta, \dots, \xi$  - действительные числа.

Предложим, что некоторые единицы измерения  $[p_{01}], \dots, [p_{0k}]$  являются независимыми между собой. Это означает, что формула размерностей любой этих единиц не может быть представлена как функция (полученная посредством умножения или деления) формул размерностей остальных независимых единиц. При этом признаком независимости является неравенство нулю хотя бы одного определителя  $D$ , составленного из показателей степеней  $a, b, \dots, q$  в формулах размерностей для  $[p_{01}], \dots, [p_{0k}]$ , входящих в (3).

Для определения критериев подобия с помощью  $\pi$ -теоремы необходимо:

1. выявить  $m$  параметров  $P_1, P_2, P_3 \dots P_m$ , которые характеризуют данный процесс;
2. составить матрицу размерностей  $m$  параметров;
3. установить  $k$  независимых между собой параметров;
4. представить описание изучаемого явления в критериальной форме;
5. составить  $m-k$  критериев подобия.

Определим параметры, характеризующие процесс поражаемости воздушной линии электропередач прямым ударом молнии [6,7].

К факторам, влияющим на поражаемость, можно отнести факторы молнии и конструктивные особенности линий электропередач, а именно:

1. ток молнии ( $I_m$ );
2. крутизна фронта молнии ( $\alpha$ );
3. высота ориентировки молнии ( $H_{op}$ );
4. расстояние между крайними проводами ( $D$ );
5. высота подвеса проводов ( $H_{под}$ );
6. заряд на проводе ( $q$ );
7. смещение точки ориентировки от оси линии ( $h$ ).

Функциональная зависимость, подлежащая исследованию, имеет вид:

$$f(I_m, \alpha, H_{op}, D, H_{под}, q, h) = 0. \quad (4)$$

При выборе системы единиц необходимо учесть то, что в описываемом процессе участвуют электрические и механические параметры. Наиболее оптимальной является система единиц LMТI где: L - линейный размер (длина), M - масса, T - время, I - ток.



Процесс поражения воздушных линий прямыми ударами молнии описывается 7-ю параметрами, матрица размерностей параметров, описывающих исследуемый процесс, имеет вид:

Таблица 1 – Характеристика процесса

Обозначение	L	M	T	I
$I_m$	0	0	0	1
A	2	1	-4	-1
$H_{op}$	1	0	0	0
D	1	0	0	0
$H_{под}$	1	0	0	0
Q	0	0	1	1
H	1	0	0	0

Выберем произвольно четыре независимых параметра, пусть для данной системы измерений, независимыми величинами будут:  $P_1 = H_{под}$ ,  $P_2 = \alpha$ ,  $P_3 = q$ ,  $P_4 = I_m$ . Главное условие независимости – неравенство нулю определителя, составленного из показателей, основных единиц входящих в матрицу размерностей выбранных параметров.

$$P := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & -4 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$P = 1$$

$$\text{rank}(P) = 4$$

Поскольку для матрицы P определитель не равен нулю и ранг равен 4, следовательно, данные параметры действительно независимы, и число независимых переменных выбрано верно ( $k=4$ ). Следовательно, число критериев подобия ( $m-k$ ) будет равно 3. Общий вид критериев подобия будет определяться выражением:

$$\pi_1 = \frac{P_{k+1}}{P_1^{a_{k+1}} \cdot P_2^{b_{k+1}} \cdot \dots \cdot P_k^{e_{k+1}}} \quad (5)$$

Дальнейшая задача – определение показателей размерности  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  ... и т.д. Для этого выразим все величины, входящие в критерий подобия, через основные единицы измерения и приравняем показатели одноименных основных величин, стоящих в числителе и знаменателе.

Нами были определены критерии подобия для параметров, влияющих на поражаемость воздушных линий.

Полученные критерии имеют следующий вид:

$$\pi_1 = \frac{H_{под}}{H_{op}}; \quad (6)$$

$$\pi_2 = \frac{H_{под}}{D}; \quad (7)$$

$$\pi_3 = \frac{H_{под}}{h}. \quad (8)$$

Полученные критерии могут быть использованы при построении эксперимента по поражаемости воздушных линий электропередачи средних классов напряжения прямыми ударами молнии [8,9].

**Выводы.** В данной статье рассмотрены факторы, влияющие на поражаемость воздушных линий, и получены критерии для создания физической модели по исследованию процесса поражаемости воздушных линий электропередач прямыми ударами молнии.

**Список литературы:** 1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. / В.А. Веников. - Учеб. пособ. для вузов- М., «Высшая школа», 1976. 2. Александров Г. Н. Исследование на модели молниезащиты линий электропередачи, выполненных на опорах охватывающего типа. / Г. Н. Александров, Г. В. Подпоркин, С. Ю. Шевченко // Электричество. - No 1. - 1991. - 54-58 3. Transmission line reference book; 115—138 kV compact line designs. — EPRI, 1978. 4. Barthold L. O., Barnes N. C. High phase order power transmission. — Electra, 1972, N 24. 5. Адлер Ю. П. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее / Ю.П. Адлер, - Ю. В. Грановский, Е. В. Маркова — М.: Знание, 1982. 6. Александров Г. Н. Новые средства передачи электроэнергии в энергосисте max / Под ред, Г. Н. Александрова. — Л.; Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. 7. Базелян Э. М. Инженерные и физические основы молниезащиты. / Э.М. Базелян, Б.Н. Горин, В.Н. Левитов— М.: Гидрометеоздат, 1974. 8. Шевченко С. Ю. Поражаемость воздушных линий распределительных сетей с защищенными проводами грозowymi разрядами. / С.Ю. Шевченко, Д.А., Данильченко // Вестник НТУ «ХПИ» 2016, №3. 9. Shevchenko S., Danilchenko D. Defeat of overhead lines transmission networks with protected wires from lightning strike / Shevchenko S., Danilchenko D. // International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), 2015. – IEEE, 2015.–С.1-4.

**References:** 1. Venikov V.A. Teorija podobija i modelirovanija [Similarity Theory and Modeling] .Ucheb. posob. dlja vuzov- M., «Vysshaja shkola», 1976. 2. Aleksandrov G. N., Podporokin G. V., Shevchenko S. Ju., Issledovanie na modeli molniezashhity linij jelektroperedachi, vypolnennyh na oporah ohvatyvajushhego tipa. [Lightning model study on transmission lines formed on the female-type supports.], - Jelektrichestvo No 1, 1991 54-58 3. Transmission line reference book; 115—138 kV compact line designs. — EPRI, 1978. 4. Barthold L. O., Barnes N. C. High phase order power transmission. — Electra, 1972, N 24. 5. Adler Ju. P.,- Granovskij Ju. V., Markova E. V. Teorija jeksperimenta: proshloe, nastojashhee, budushhee [Experiment Theory: Past, Present, Future],— М.: Znanie, 1982. 6. Aleksandrov G.N. Novye sredstva peredachi jelektrojenergii v jenergosisiste [New means of power transmission in the power system].— L.; Izd-vo Leningr. un-ta, 1987. 7. Bazeljan Je. M., Gorin B. N., Levitov V. N. Inzhenernye i fizicheskie osnovy molniezashhity [Engineering and physical fundamentals of lightning].— М.: Hidrometeoizdat, 1974. 8. Danil'chenko D. A., Shevchenko S. Ju., Porazhaemost' vozdushnyh linij raspreditel'nyh setej s zashhishhennymi provodami grozovymi razrjadami. [The affecting overhead lines of distribution networks with secure wired lightning.] Vestnik NTU «HP» 2016, #3. 9. Shevchenko S., Danilchenko D. Defeat of overhead lines transmission networks with protected wires from lightning strike // International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF), 2015 – IEEE, 2015. – P. 1-4.

Поступила (received) 15.11.16

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Аналіз можливості створення фізичної моделі вражаємості лінії електропередавання прямими ударами блискавки / С. Ю. Шевченко, Д. О. Данильченко, О. М. Равлик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017.– No 31 (1253). – С. 78 – 82. Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Анализ возможности создания физической модели поражаемости линии электропередач прямыми ударами молнии / С. Ю. Шевченко, Д. А. Данильченко, А. М. Равлик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017.– No 31 (1253). – С. 78 – 82. Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Analysis of possible creation of physical models affection transmittiom power lines direct lightning strike. S. Shevchenko, D. Danylchenko A. Ravlik// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability an- denergy efficiency.–Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 31 (12533). – P. 78–82. –Bibliogr.: 9. – ISSN 2224-0349.**

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

**Шевченко Сергей Юрьевич**– доктор технических наук, профессор кафедры передачи электрической энергии НТУ «ХПІ», г. Харьков;

**Shevchenko Sergei Yurevich** - doctor of Technical sciences, professor of the department of electric power transmission NTU "KhPI", Kharkov;

**Данильченко Дмитрий Алексеевич** – асистент кафедры передачи электрической энергии НТУ «ХПІ», г. Харьков; тел. 093 98 92 362.;e-mail: danylchenko.e@khi.edu.ua

**Danylchenko Dmitry Alexeyevich** - assistant of the department of electric power transmission NTU "KhPI", Kharkov; Phone 093 98 92 362.

**Равлик Александр Михайлович** – доктор технических наук, доцент кафедры передачи электрической энергии Национального университета «Львовская политехника», г. Львов;

**Ravlik Alexander Mikhailovich** – doctor of Technical sciences, docent of the department of electric power transmission NU "Lvivska politechnika", Lviv;

УДК 621. 316

**С.Ю. ШЕВЧЕНКО, С. И. ДРИВЕЦКИЙ****ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ И ВЕЛИЧИНЫ НАВЕДЕННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ С ЗАЩИЩЕННЫМИ ПРОВОДАМИ, ПРИ УДАРАХ МОЛНИИ ВБЛИЗИ ЛИНИЙ**

Задачей исследований, было выяснить при помощи экспериментов изменяется ли фронт индуцированного перенапряжения по сравнению с исходным импульсом напряжения. Второй задачей являлось измерение амплитуды индуцированного на проводе импульса перенапряжений. Полученные результаты показывают, что форма подаваемого и наведенного импульса напряжения - одинаковы. Величины наведенных напряжений получены в экспериментах свидетельствуют о достаточно высокой степени связи провода и канала импульсного разряда, что подтверждает опасность индуцированных перенапряжений для воздушных линий электропередач.

**Ключевые слова:** наведенные перенапряжения, амплитуда, распределительные сети, воздушная линия электропередачи, грозовые перенапряжения.

Завданням досліджень, було з'ясувати за допомогою експериментів чи змінюється фронт індукованої перенапруги в порівнянні з вихідним імпульсом напруги. Другим завданням було вимір амплітуди індукованого на дроті імпульсу перенапруг. Отримані результати показують, що форма подаємої і наведеної імпульсу напруги - однакові. Величини наведених напруг отримані в експериментах свідчать про досить високий ступінь зв'язку проводу і каналу імпульсного розряду, що підтверджує безпеку індукованих перенапруг для повітряних ліній електропередач.

**Ключо-**

**ві слова:** наведені перенапруги, амплітуда, розподільні мережі, повітряна лінія електропередачі, грозові перенапруження.

The aim of research was to find out with the help of experiments to see if the front of the induced surge in comparison with the initial voltage pulse. The second objective was to measure the amplitude of the induced surges on the wire. Power lines with voltage of 6-35 kV have very low levels of lightning-proof because of the low electrical resistance pin insulators and high probability of short circuit after pulse overlap. In addition, with a high probability of the power lines insulation is covered by the induced surge at close lightning strikes the ground. Overhead lines with protected wires are tangible operational and technical advantages over overhead lines with bare wires at the defectiveness, greater reliability. The peculiarity of the problem of lightning protection of such lines is that in the absence of special measures when stormy ceiling insulator line, followed by a breakdown of solid insulation wires. The results show that the shape of the feed and the induced voltage pulse is not changed. The magnitude of the induced voltage, confirms that a high degree of communication wires and channel pulsed discharge, which confirms the risk of induced surge for overhead power lines. These experimental results suggest that under the given experimental conditions, the shape of the supply and induced pulse on the line does not change.

**Keywords:** the pointed overstrains amplitude, distributive networks, air-track of electricity transmission, storm overstrains.

**Введение.** Анализ опыта эксплуатации распределительных электрических сетей показывает, что их надежность ниже, чем у сетей более высоких классов напряжения. Повреждения в распределительных сетях обуславливают большую часть ущерба, связанного с перерывами в электроснабжении потребителей. Одной из основных причин аварий и нарушений являются грозовые перенапряжения на воздушных линиях (ВЛ), вызывающие импульсные перекрытия и разрушения изоляторов и приводящие к дуговым замыканиям, с сопутствующим повреждением оборудования, и отключением линии. Аварийные отключения ВЛ 6-35 кВ по причине грозовых перенапряжений составляют до 40 % от общего числа их отключений. Из-за низкой импульсной прочности изоляция распределительных сетей может быть подвержена перекрытиям как от перенапряжений при прямых разрядах молнии, так и от индуцированных перенапряжений при разряде молнии вблизи линии. Последние являются основной причиной грозовых отключений и повреждений оборудования сетей 6-35 кВ, составляя в некоторых случаях до 90 %, а при прохождении трассы ВЛ по лесному массиву и до 100 % от их общего количества. Таким образом, надежность электроснабжения потребителей во многом зависит от эффективности грозозащитных мероприятий. Действующие в

настоящее время нормы ПУЭ не предусматривают средств защиты от грозовых перенапряжений ВЛ с неизолированными проводами напряжением до 20кВ.

**Анализ последних исследований и достижений.** Самым известным средством, которое, хотя и не защищает непосредственно от грозовых воздействий, но сокращает степень их последствий, служит АПВ, эффективность которого для распределительных сетей составляет не более 50 %. Поскольку оно, к тому же, негативным образом отражается на коммутирующем и другом высоковольтном оборудовании, АПВ применяется далеко не везде. Такое состояние проблемы грозозащиты распределительных ВЛ привело к признанию неизбежности их грозовых аварийных отключений и повреждений в силу отсутствия экономически доступных технических средств. В то же время, осуществляемая в последние годы в нашей стране техническая политика, направленная на применение в распределительных ВЛ защищенных проводов, существенным образом способствовала выработке и принятию новых прогрессивных технических решений в области грозозащиты. Воздушные линии с защищенными проводами (ВЛЗ) имеют ощутимые эксплуатационно-технические преимущества перед ВЛ с неизолированными проводами по меньшей повреждаемости,

большей надежности. Особенностью проблемы грозозащиты ВЛЗ является то, что в случае отсутствия специальных мер при грозовом перекрытии изолятора линии, сопровождаемом пробоем твердой изоляции провода, образующаяся с большой вероятностью дуга промышленной частоты не имеет возможности перемещаться по проводу и горит в месте пробоя изоляции до момента отключения линии. Это может привести к прожогу изоляции провода, пробоем изолятора линии, а в случае возникновения дуги — к пережогу провода. Поскольку на линии с неизолированными проводами дуга под воздействием электродинамических сил способна перемещаться одним из своих концов вдоль провода, фактор повреждения провода вследствие теплового воздействия дуги был малозначим, и никак не влиял на формирование концепции грозозащиты ВЛ. В случае же ВЛЗ предотвращение пережога провода становится главным условием, определяющим необходимость обязательного применения тех или иных грозозащитных мер.

Существующий опыт применения разрядников и ОПН для защиты ВЛ от грозовых перенапряжений и теоретические исследования показывают, что их технические возможности не могут в полной мере удовлетворить предъявляемым к ним требованиям в соответствии с условиями работы на воздушной линии при воздействии грозовых разрядов. Так, даже самые совершенные из успешно применяемых для грозозащиты подстанционного оборудования ОПН не способны без разрушения выдерживать те реально возможные токи разряда молнии, которые будут протекать через них в случае установки на ВЛ. Искровые воздушные промежутки приводят только к увеличению числа отключений ВЛ, поскольку не способны гасить сопровождающую грозовое перекрытие дугу.

Основной недостаток вентильных разрядников связан с тем, что резисторы на основе карборунда обладают сравнительно невысокой нелинейностью. Снижение защитного отношения РВ достигается ценой значительного усложнения искровых промежутков, которые в разрядниках I группы принимают на себя часть напряжений гашения.

Выпускаемые в нашей стране и за рубежом резисторы на основе окиси цинка обладают значительно большей нелинейностью, чем резисторы на основе карборунда. Это позволило создать новый тип защитного аппарата — нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН). Преимуществами ОПН являются возможность глубокого ограничения перенапряжений, в том числе междуфазных, малые габариты, позволяющие использовать их в качестве опорных изоляционных колонн, большая пропускная способность.

Уровень ограничения коммутационных перенапряжений с помощью ОПН составляет (1,65–1,8) Uф. Уровень ограничения грозовых перенапряжений составляет (2,2–2,4) Uф в сетях 110 кВ и снижается до 2Uф для линий электропередачи 750 кВ.

Ограничители комплектуются в виде параллельно соединенных колонок из дисков диаметром 28 и высотой 8 мм. Торцы дисков металлизированы и обеспечивают контакт между дисками. В соответствии с пропускной способностью число параллельных колонок резисторов в ОПН варьируется от четырех в ограничителе перенапряжения на 110 кВ до 30 в ограничителе на 750 кВ.

Коэффициент нелинейности резисторов ОПН в области ограничения коммутационных перенапряжений имеет значение 0,03–0,05. При ограничении грозовых перенапряжений, когда токи, протекающие через ОПН, достигают значений нескольких килоампер, коэффициент нелинейности возрастает до 0,07–0,1. Такая высокая нелинейность обуславливает прохождение при рабочем напряжении или резонансных перенапряжениях через нелинейные резисторы тока порядка долей миллиампера на одну параллельную колонку. Это позволяет исключить искровые промежутки и подключать резистор ОПН непосредственно к сети.

Применительно к ОПН отсутствует понятие напряжения гашения. Однако длительное воздействие резонансных перенапряжений, связанных с прохождением через ОПН больших токов, может нарушить тепловую устойчивость аппарата и привести к аварии. В связи с этим для ОПН установлены допустимые длительности приложения повышенных напряжений, которые должны быть скоординированы с действием релейных защит

При ударе молнии в линию или вблизи нее, на проводах линии возникает грозовое перенапряжение, под воздействием которого изоляция линии может перекрыться. После грозового перекрытия изоляции, вероятность установления силовой дуги главным образом зависит от средней напряженности электрического поля, создаваемой рабочим напряжением линии на канале перекрытия.

**Цель работы.** Исследование формы и величины наведенных перенапряжений, возникающих в воздушных линиях с защищенными проводами (ВЛЗ), при ударах молнии вблизи линий.

**Постановка задачи:** Определить при помощи экспериментов изменяется ли фронт индуцированного перенапряжения по сравнению с исходным импульсом напряжения. Второй задачей являлось измерение амплитуды индуцированного на проводе импульса перенапряжений.

**Методы исследования.** ВЛ 6–35 кВ имеют очень низкий уровень грозоупорности из-за малой электрической прочности штыревых изоляторов и высокой вероятности возникновения К.З. после импульсного перекрытия. Кроме того, с большой вероятностью изоляция этих ВЛ перекрывается от индуцированных перенапряжений при близких ударах молнии в землю.

В связи с этим группа специалистов Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» приступила к исследованиям возможности повышения грозоупорности линий с защищенными проводами.

В лаборатории сверхвысоких напряжений кафедры «Передача электрической энергии» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» была создана модель ВЛ позволяющая смоделировать линию с защищенными проводами. Эта модель дает возможность выполнить эксперименты для исследования формы и величины наведенных перенапряжений, возникающих на воздушных линиях с защищенными проводами, при ударах молнии вблизи линий при различных геометрических параметрах линий.

В качестве источника высокого напряжения использовался генератор импульсных напряжений (ГИН) с максимальным напряжением 2.4 МВ.

При проведении экспериментальных исследований были выбраны следующие параметры модели:

- Электрод расположен на высоте 0,4 м от поверхности «земли»;
- На различных высотах (от 30 до 60 см) от поверхности «земли» был подвешен защищен провод, подключенный к емкостному делителю напряжения 500 кВ с оптической развязкой, к которому был подключен осциллограф;

- Электрод, имитирующий молнию был сдвинут на расстояния от 50 до 120 см от подвешенного защищенного провода;

- Зарядное напряжение ГИН составляла 50 кВ на этаж, что в общей сумме составило около 600 кВ.

Как указывалось выше измерения такого сигнала проводились при помощи емкостного делителя с емкостью 5пФ, которая существенно ниже, чем емкость провода. Такое соотношение емкостей дает возможность утверждать, что делитель не вносит погрешности в измерения.

В результате опытов были получены экспериментальные зависимости наведенных напряжений при различных параметрах модели приведенные на рис. 1-5.

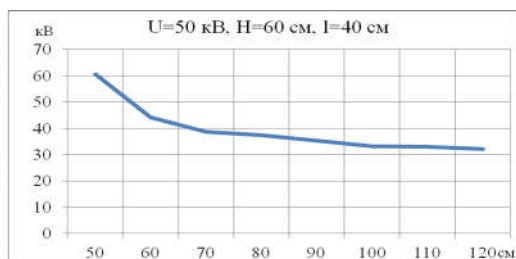


Рис 1. Напряжение 600 кВ (50 кВ на этаж), высота подвеса провода H=60 см, и удаление электрода имитирующего молнию на l=40 см.

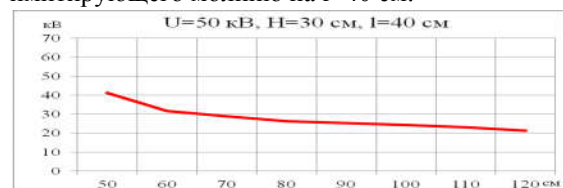


Рис 2. Напряжение 600 кВ (50 кВ на этаж), высота подвеса провода H=50 см, и удаление электрода имитирующего молнию на l=40 см.

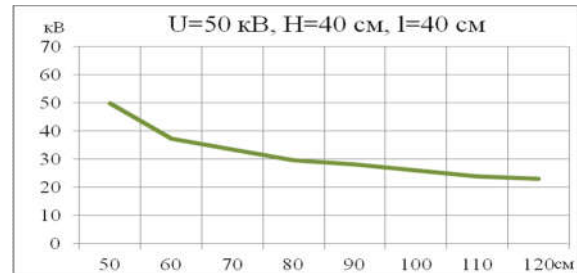


Рис 3. Напряжение 600 кВ (50 кВ на этаж), высота подвеса провода H=40 см, и удаление электрода имитирующего молнию на l=40 см.

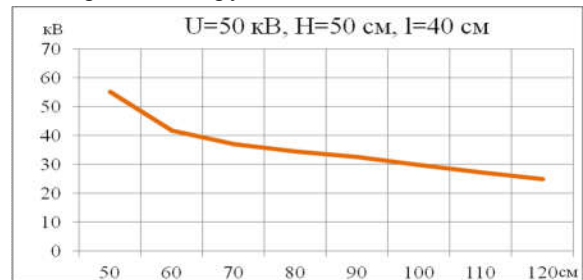


Рис 4. Напряжение 600 кВ (50 кВ на этаж), высота подвеса провода H=30 см, и удалении электрода имитирующего молнию на на l=40 см.

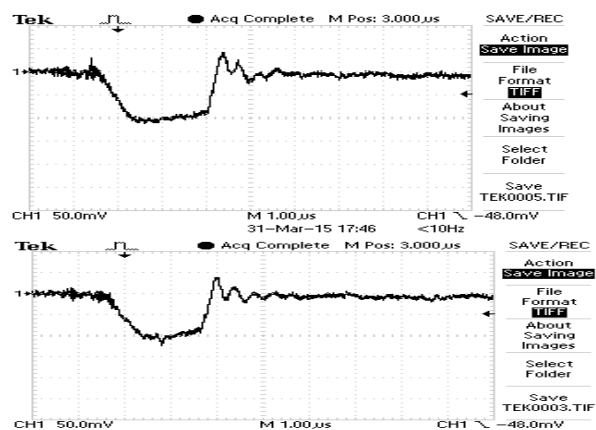


Рис. 5 Осциллограммы полученных результатов: а) - величина наведенного напряжения составила около 20 кВ; б) - форма наведенного на защищенном проводе перенапряжения

Полученные в результате экспериментов осциллограммы наведенного и исходного напряжений, приведены на рис 5., как видно, предположения некоторых исследователей, об изменении формы наведенного на проводах ВЛЗ перенапряжения, в частности увеличения длины фронта импульса выявлено не было. Этот факт свидетельствует о том, что при защите ВЛЗ от наведенных перенапряжений, защитные аппараты должны быть расположены на каждой опоре хотя бы в одной фазе, а не как предлагали некоторые исследователи, один на несколько опор. Связано это со стандартной величиной фронта импульса 1,2с, которая как указывалось выше, остается неизменной.

**Выводы.** 1. Полученные результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что при заданных условиях эксперимента, форма воздействующего и наведенного импульса, на проводе не изменяется. 2. В результате проведённых экспериментов, была измерена величина наведенного напряжения, которая находилась в пределах от 21 кВ до 61кВ. 3.

3. Для вычисления расчетов грозоупорности ВЛЗ необходимо получить зависимость вероятности возникновения наведенных перенапряжений имеющих величины опасные для изоляции подопных линий.

**Список литературы.** 1. Юриков А.П. «Защита линий электропередач от грозных перенапряжений». - М.: Энергоатомиздат 1983. – 88с., ил. – (Б-ка электромонтера; Вып. 552). 2. Г. В. Подпоркин, А. Д. Сиваев Современная грозозащита распределительных воздушных линий 6, 10 кВ длинно-искровыми разрядниками, Электро, М., 2006, №1. 3. Г. В. Подпоркин, В. Е. Пиль-

щиков, А. Д. Сиваев Защита компактных ВЛ 10 кВ от грозных индуцированных перенапряжений, Энерго-инфо, М., 2007, №4. 4. Базелян Э. М., Горин Б. Н., Левитов В. Н. Инженерные и физические основы молниезащиты.— М.: Гидрометеоздат, 1974. 5. Закарюкин В.П. Техника высоких напряжений: Конспект лекций. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 137 с.

**References:** 1. Yurikov A.P. «Zaschita liniy elektroperedach ot grozovyih perenapryazheniy». - M.: Energoatomizdat 1983. – 88s., il. – (B-ka elektromontera; Vyip. 552). 2. G. V. Podporokin, A. D. Sivaev Sovremennaya grozozaschita raspredelitelnykh vozdushnykh liniy 6, 10 kV dlino-iskrovymi razryadnikami, Elektro, M., 2006, #1. 3. G. V. Podporokin, V. E. Pilschikov, A. D. Sivaev Zashchita kompaknykh VL 10 kV ot grozovyih induktirovannykh perenapryazheniy, Energo-info, M., 2007, #4. 4. Bazelyan E. M., Gorin B. N., Levitov V. N. Inzhenernyye i fizicheskiye osnovy molniezaschityi. — M.: Gidrometeoizdat, 1974. 5. Zakaryukin V.P. Tehnika vyisokih napryazheniy: Konpekt lektsiy. – Irkutsk: IrGUPS, 2005. – 137s.

Поступила (received) 16.05.16

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Дослідження форми і величини наведених перенапруг, що виникають повітряних лініях з захищеними проводами, при ударах блискавки поблизу ліній / С. Ю. Шевченко, С. І. Дривецький // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016.– No 31 (1253). – С. 83 – 86. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Исследование формы и величины приведенных перенапряжений, которые возникают воздушных линиях защищенными проводами, при ударах молнии вблизи линий / С. Ю. Шевченко, С. И. Дривецкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016.– No 31 (1253). – С. 83 – 86. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Research of form and size of the pointed protected wires, from shots of lightning near by lines / S. Shevchenko, S. Drivetskiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.–Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No. 5 (1235). – P. 83–86. –Bibliogr.: 6. – ISSN 2224-0349.**

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

**Шевченко Сергей Юрьевич**– доктор технических наук, професор кафедры передачи электрической энергии НТУ «ХПІ», г. Харьков;

**Shevchenko Sergei Yurevich**- doctor of Technical sciences, professor of the department of electric power transmission NTU "KhPI", Kharkov;

**Дривецький Станислав Игоревич**–асистент кафедры передачи электрической энергии НТУ «ХПІ», г. Харьков; тел. 0507804900.; e-mail: [stas\\_driver@bigmir.net](mailto:stas_driver@bigmir.net)

**Drivetskiy Stanislav Igorevich** –assistant of the department of electric power transmission NTU "KhPI", Kharkov; Phone 0507804900.; e-mail: [stas\\_driver@bigmir.net](mailto:stas_driver@bigmir.net)

УДК 620.91

**D. SHOKAROV, V. CHORNA, K. BOGODIST****ECONOMIC FEASIBILITY STUDY OF EXPEDIENCY OF ESTABLISHMENT OF SOLAR MODULES IN THE PRIVATE HOUSEHOLD**

The question of rather economic feasibility of use of solar modules in a private household as the power supply of household appliances is considered under the conditions of use of "a green tariff" in this article. The results of the calculations of the greatest possible volume of development of electric energy by solar modules for a year are given. On the basis of a method of discounting return on the investment in a photoelectric system is defined.

**Keywords:** solar modules, rechargeable battery, green tariff, solar power, payback, efficiency.

В роботі розглянуто питання щодо економічної доцільності застосування сонячних модулів в приватному домогосподарстві в якості джерела живлення побутових приладів та за умов використання «зеленого тарифу». Приведено результати розрахунків максимально можливого обсягу вироблення електричної енергії сонячними модулями протягом року. На основі метода дисконтування визначено окупність інвестицій у фотоелектричну систему.

**Ключові слова:** сонячні модулі, акумуляторна батарея, зелений тариф, сонячна енергетика, окупність, ефективність.

В работе рассмотрены вопросы экономической целесообразности применения солнечных модулей в частном хозяйстве в качестве источника питания бытовых приборов и при использовании «зеленого тарифа». Приведены результаты расчетов максимально возможного объема выработки электрической энергии солнечными модулями в течение года. На основе метода дисконтирования определена окупаемость инвестиций в фотоэлектрическую систему.

**Ключевые слова:** солнечные модули, аккумуляторная батарея, зеленый тариф, солнечная энергетика, окупаемость, эффективность.

**The statement of the problem.** Constantly growing prices of electricity, deterioration in its consumer qualities, the set consumption limits, high cost of connection to electric networks, and sometimes even impossibility of it, induce to use of alternative energy sources.

The solar power which is based on the direct transformation of energy of sunlight into other types of energy

[1-2] is one of the perspective directions of alternative power engineering. The solar power is an environmentally friendly branch which development is stimulated with both economic factors, and programs of the state support existing in many countries. Ecological purity and availability of energy of the sun caused its wide application in many countries of the world. Photo-electric stations not only generate the free electric power, but also provide uninterrupted power supply that in the conditions of constant planned shut-downs will be very urgent.

The fact that energy of sunlight which gets to the Earth's surface in one week exceeds the total energy of world reserves of oil, gas, coal and uranium is well-known.

Therefore, annually the number of solar power stations increases by 20-25% and this tendency remains.

In Ukraine the solar power stations have become an extremely perspective segment of the market since 2008 which grows by 70-90% annually thanks to the biggest in Europe "green" tariff, and the solar systems on the roofs of the cottages and houses are becoming more and more popular thanks to the reduction of cost of solar batteries and the accumulation of the experience of the Ukrainian experts [3-5] every year.

According to "The rule of sale, the account and

calculations for the electric energy developed from energy of sunlight by power generation facilities (the generating installations) of private households" on a "green" tariff solar systems are installed on constructions or their parts which are in the property or use of individuals. In the buildings the electric energy is used for the satisfaction of household requirements and or personal agricultural needs.

For the accounting of the electric energy developed by a private household the power supplier uses the bidirectional metering device of active electric energy which determines volumes of the electric energy separately, and also the balance which is released in the electric network and received from the network between them. The usage of two unidirectional metering devices with stoppers of reverse motion which consider separately volumes released in electric network and received from the electric network is allowed. The calculation of the difference of the energy used and generated in the power supply network is monthly carried out. The positive difference is paid to the owner of a household for a "green" tariff. According to the Contract of the purchase-sale between the consumer and the power supplier, the last undertakes to get on a "green" tariff all electric power developed by the generating installation of the consumer over quantity of the electric power used per month.

Thus, the expediency of establishment and the usage of solar systems in private households today is still an important question.

**The main research material.** The object of research is the private house of the village Krivushi, Poltava region which power supply is carried out from the existing transformer substation which has been in operation since 1971-1972 p which means that the high-quality power supply of consumers cannot be carried out at a high level.

Putting into operation of the new generating capacities without capital investment in the existing power network regional power can improve the position of all the participants of the power market.

The main consumers of the electric power in the house are household appliances with a general power

of 5,86 kW. Proceeding from the schedule of the consumption of energy (fig. 1), it is possible to state the following: the largest power is spent in the morning and in the evening.

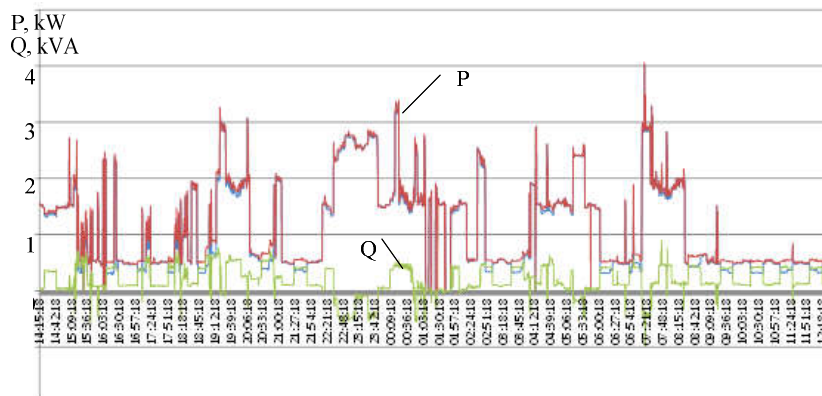


Fig. 1 – The chart of the consumption of the electric energy by the house within a day

The maximum power consumption per day is 4,5 kW, minimum - 0,5. The analysis of energy consumption of the private house showed (tab. 1) that in 2015 – 9364 kW of electric energy for the sum of 12855 UAH were used at a tariff for electric energy of 1,56

UAH/kW per year. At the same time it should be noted that in the house the two-zonal counter of the electric power is installed, therefore, the calculations of the payment are defined with tariffs according to the part of the day.

Table 1 – The calculation of the cost of the used electric energy per year

№	Month	Total, kW per year	Day, kW per year	Night, kW per year
1	January	850	510,0	340,0
2	February	787	472,2	314,8
3	March	758	454,8	303,2
4	April	734	440,4	293,6
5	May	687	412,2	274,8
6	June	664	398,4	265,6
7	July	786	471,6	314,4
8	August	824	494,4	329,6
9	September	768	460,8	307,2
10	October	815	489,0	326,0
11	November	826	495,6	330,4
12	December	865	519,0	346,0
	<b>Total</b>	<b>9364</b>	<b>5706</b>	<b>3658</b>

Taking into consideration the theoretically reasonable expediency of establishment of solar panels in a private household it is necessary to carry out the detailed feasibility study on such action. The first stage consists of the determination of the quantity and the choice of the electrotechnical equipment for ensuring reliable operation of solar modules. The second stage is the calculation of the economic indicators of the expediency of establishment and operation of a solar minipower plant.

Having two parameters - the quantity of the average annual consumed electric power and the value of the size of the peak necessary power (fig. 1), it is possible to define the structure of the necessary equipment in the system of the power supply, previously having defined an optimum angle of an inclination of the solar modules [1,6]. For Poltava region the optimum angle of an inclination equals the value of latitude of the area and represents about 49°. The calculation of the quantity and the power of the electrotechnical equipment is carried out on a given lower technique.



The maximum space which is occupied by one solar module, is defined from the formula:

$$S_{\max} = l \cdot b_{\max} \quad (1)$$

$l$  – length of the module;

$b_{\max}$  – the shadow size from the solar module.

The number of the solar modules located on a building roof:

$$n_{sm} = \frac{\sum S_z + \sum S_t}{S_{\max}}, p., \quad (2)$$

$S_z$  – the roof area of the building, sq.m;

$S_t$  – the free area of the territory which is near the building, sq.m.

The average annual amount of the energy developed by solar photo cells is defined from the formula:

$$W = k \cdot P \cdot E_{n_{sm}} / 1000, kW \cdot p. year \quad (3)$$

$P$  – the power of one module;

$E_{n_{sm}}$  – total insolation for the chosen period for the respective area [3];

$k$  – 0,5 and 0,7 correction coefficients for the summer and winter period respectively.

The general capacity of accumulator system:

$$C_{\Sigma} = \frac{W}{U_n \cdot \eta}, A \cdot h. \quad (4)$$

$W$  – total power;

$U_n$  – volume of batteries.

On the basis of these data the necessary number of rechargeable batteries is defined:

$$n_b = \frac{C_{\Sigma}}{C_b}, p. \quad (5)$$

For the decrease in depth of the category on each of the accumulators the total number of the rechargeable batteries is accepted 5-6% more from the settlement.

As a rule, the solar modules are used in the autonomous and reserve systems of the power supply together with controllers of the charge. They play a key role in ensuring the effective work of the photo-electric station, preserving rechargeable batteries against the battery discharge and the deep discharge, prolonging the term of their service. The application of the controller not only continues the battery service life, but also allows to use the energy received from the solar panel for a charge more effectively. The gain of efficiency represents about 15-20%.

An important "link" of the solar power station is the inverter which function is the automatic redistribution of the power between two sources of electric energy. The power of the inverter necessary for a concrete autonomous object is defined as the total power of the consumption of all electric equipment which is in it. The number of inverters is determined by a formula:

$$n_{inv} = \frac{P_{\Sigma}}{P_{inv}}, p. \quad (6)$$

$P_{\Sigma}$  – total power of electric equipment;

$P_{inv}$  – the power of one inverter, W.

Using the given algorithm of calculations and the choice of the equipment, the quantity and types of solar panels, the inverter and rechargeable batteries (tab. 2) were defined.

The development and deployment of the solar power station for a household consists of several stages: the development of the technical documentation, the assembly and balancing and commissioning. For the exact definition of the expenses at the first stage the calculation of the method through the labor input is used. It is known that the development of the specification lies in the development of the technical offer, outline and technical projects, the development of working design documentation.

On each stage the performers, namely the leading engineer and the technician, carry out the work on the formation of a set of documents. In the view of standard documentation, it is established that for such work the leading engineer needs about 26 hours, the technician - 8 hours. The rate of the salary of workers is carried out on hourly system of compensation, proceeding from an hour tariff rate.

The cost of the installation and construction works depending on an arrangement of solar panels makes 10% of equipment cost. The expenses of balancing and commissioning represent 5% of the capital investments in the activity.

Besides, during the economic calculations it is necessary to consider annual expenses on the operation of installation which consists of the checking of the condition of elements of fastening of photo-electric modules, the operability of panels, the cleaning of solar panels, the inverter and the fan of cooling of dust, the check of a condition of contacts and isolation of wires, the control of a condition of the electric wiring, and accounts for the 5% of equipment cost.

Considering it, the accounting of the expenses on the establishment of solar power station can be presented in table 2.

Table 2 – The capital investment in photo-electric modules

Name of the Equipment	Code/series	Number (p., m)	Price for on with VAT, UAH	Total, UAH
1	2	3	4	5
Main equipment				
Network inverter	Conext CL20000 E	1	88508	88508
Solar panels	SolarFrontier SF-170S	84	3712	311808
Accumulators	ST-12110	8	4794	38352
Total for main equipment				<b>438668</b>
Additional equipment				
Materials for installing the panels		84	460	38640
Cable and conduction production for SP		20	46,5	930
Cable 3 ph. from inverter	3x10	10	79,1	791
Connectors for installing SP	<b>MC4</b>	84	54	4536
Other				7200
Total for additional equipment				<b>52097</b>
Expenses on project				8700
Solar panel installation				43866,8
Balancing and commissioning				21933
Total for the work				74499,8
<b>Total sum of capital investment</b>				<b>565264,8</b>

For economic feasibility study of the expediency of the use of solar modules in a private household it is necessary to determine the energy volume which they can make. This depends on the amount of solar energy

which reaches the solar elements, namely from sunlight indicators for a certain area [7]. The electric power output is calculated by solar modules of the house for the Poltava region by the formula (3).

Table 3 – The calculation of the cost of the used electric energy per year

№	Year	Total, kW per year	Consumption day/night, kW per year	The cost of the energy according to the day tariff, UAH	The cost of the energy according to the night tariff, UAH	Total cost of the energy, UAH	Power generation, kW per year		The cost of the generated energy, UAH.
							per one day	per one month	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	January	850	510/340	795,60	265,2	1060,8	15,3	474	2649,66
2	February	787	472,2/314,8	736,63	244,92	981,55	26,7	748	4181,32
3	March	758	454,8/303,2	709,49	236,5	945,99	45,4	1410	7881,9
4	April	734	440,4/293,6	687,02	229,01	916,03	56,0	1980	11068,2
5	May	687	412,2/274,8	643,03	213,72	856,75	62,4	1930	10788,7
6	June	664	398,4/265,6	621,50	207,17	828,67	64,6	1940	10844,6
7	July	786	471,6/314,4	735,70	245,23	980,93	62,0	1920	10732,8
8	August	824	494,4/329,6	771,26	257,09	1028,35	61,0	1890	10565,1
9	September	768	460,8/307,2	718,85	239,62	958,47	48,9	1470	8217,3
10	October	815	489,0/326,0	762,84	254,28	1017,12	35,6	1100	6149
11	November	826	495,6/330,4	773,14	257,71	1030,85	16,6	498	2783,82
12	December	865	519,0/346,0	809,64	269,88	1079,52	12,3	381	2129,79
	<b>Total</b>	<b>9364</b>	<b>5706/3658</b>		<b>2920,33</b>	<b>11685,3</b>		<b>15741</b>	<b>87992,19</b>

The principle of work of mini power plant lies in the following: it is developed photo-electric by modules in the afternoon the electric power is consumed for their own needs and given to the network of the power supply on a "green" tariff [4-5], and at night the household consumers for twice as less, than in the afternoon tariff consume energy from the network. According to it, the cost of the electric power which is consumed from network and is generated by solar panels (tab. 3) was calculated.

Among the economic indicators which characterize the usage or design of new objects an important role is played by the indicators of a payback period of capital investments and economic efficiency. It is known that for the assessment of the efficiency of the investment actions discounting method used which is exact, but demands more exact basic data and perfect calculations [8-9].

The method of the net discounted income (profit) or future available receipts provides the change of monetary assessment in time on the basis of transfer of all the future receipts on the project. For the calculation the following formula is used:

$$PV_t = \sum_{i=1}^t \frac{CF_i}{(1+r)^i}, \quad (7)$$

$r$  – the discount rate;

$t$  – the number of years of implementation of the innovative project.

The norm of discount, in the formula of a part of the unit or the percent for a year is the main economic standard which is used when discounting.

Depending on different economic tasks the rate of discounting pays off differently [10]. It is possible to distinguish model  $E$  from the known methods of calculation of a discount rate  $E$ . Fami and K. French; the models of assessment of capital assets (capm); the modified model of assessment of capital assets; M. Karkhart's model; the model of dividends of constant growth; the calculation of a discount rate on the basis of the average cost of the capital (WACC); the calculation of a discount rate on the basis of the profitability of the capital; the method of market multipliers; the calculation of a discount rate on the basis of the price stock; the calculation of the discount rate on the basis of the expert assessment.

The analysis of the presented methods shows that the modified method of the camp model allows to consider certain groups of risks at an investment of the investments as a result of the change of the interest rates, any adoption of political decisions, inflation and so forth.

Considering the nature of these risks, consider that they cannot be reduced on the basis of the diversification of the investments. Besides, the specific risks it is difficult to formalize by the means of statistics, therefore, during the calculations it is possible to consider the following amendments on risk: the influence of the state on tariffs (0,4%), the change in price for materials and accessories (0,2%), the administrative risk of the owner or investor (0,2%). Thus, accepting the base rate of the discount at the level of 15% and considering risks, the size of a discount rate will be 15,8%. The results of the calculations are shown in table 4.

Table 4 – The results of the calculation of the efficiency of the introduction of photo-electric modules

Year	Investments $I_0$ , UAH.	Cash Flow CF, UAH.	Net Cash Flow CPV, UAH.	Discounted Cash Flow NPV,UAH.
2016	565264,8	63138,86	54 524,06	-510 740,74
2017		145866,06	108 777,01	-401 963,73
2018		145866,06	93 935,25	-308 028,48
2019		145866,06	81 118,52	-226 909,96
2020		354890,8	170 432,32	-56 477,65
2021		354890,8	147 178,17	90 700,52
2022		354890,8	127 096,86	217 797,38
2023		354890,8	109 755,49	327 552,87
2024		354890,8	94 780,22	422 333,09
2025		313712,3	72 351,24	494 684,33
2026		313712,3	62 479,48	557 163,81
2027		313712,3	53 954,64	611 118,45
2028		313712,3	46 592,96	657 711,41
2029		313712,3	40235,71426	697 947,12
				<b>697 947,12</b>

When calculating the efficiency of the innovative projects the simple payback period of capital investments is defined:

$$T = \frac{CI}{E}, \quad (9)$$

$E$  - the gained economic effect of introduction of actions;  $CI$  - capital investment; but discounted, that is the earliest interval of time in the settlement period after which the current net discount income becomes and remains further positive (the net profit increases):

$$DPP = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq I_0, \quad (10)$$

$n$  - number of the periods;  $I_0$  - the size of initial investments.

**Conclusion.** From table 4 it is understood that the return of the investment will be in the 5th year, having calculated the discounted payback period, size of 5,4 years has been defined, while the simple payback period is 5,9 years.

By results of the conducted research it is possible to draw a conclusion on the expediency and economic efficiency of the usage of photo-electric elements in a private household as the power supply of household appliances. It is confirmed by the calculations of the cost for the used electric energy taking into account the two-zonal accounting of the consumption and the calculations of the costs of the generated electric energy and sold for a "green tariff" in the network of the power supply. Besides, the size of the payback period defined behind a discounting method is 5,4 years which is a rather high rate.

**References:** 1. The Solar Economy: Renewable Energy for a Sustainable Global Future / Hermann Scheer, 2004. – 368 p. 2. Fun-

damentals of modern power in 2 t. [Osnovy sovremennoy enerhetyky v 2-kh t] M.: MEI, 2010. – 646 p. 3. The law of Ukraine "About power industry" / Department of the Supreme Council of Ukraine, 1998. 4. The law No. 514-VIII / The introduction of amendments to some laws of Ukraine concerning providing competitive conditions of production of the electric power from alternative energy sources. 2015, No. 33. – 324 p. 5. Resolution № 442/28572 «On Amendments to the Procedure for sales, accounting and payments for electricity produced from solar energy electric power facilities (generating facilities) private households», 24/03/2016. 6. Vyssaryonov, V. Deriugino G., Kuznetsov V., Malinin N. (2008), "Sun energetika" [Solnechnaya enerhetyka] MEI, 317 p. 7. Access [http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES\\_INSOL\\_M](http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES_INSOL_M) 8. Vlasov, A. Vlasov, A., Krasnokutskaya, N. (1997), "Innovation Management" [Innovatsionnyy menedzhment] / - K.: KNEU, - 92 p. 9. Rud, N. (2008), "Economic justification of scientific research" [Ekonomichne obgruntuvannya naukovykh rozrobok] / - Luck: RIO LDTU, - 196 p. 10. Synadskyy, B. (2003), "Calculation rate discounting" [Raschet stavky diskontirovaniya] // «Financial Director» № 4.

**Список використаних джерел:** 1. The Solar Economy: Renewable Energy for a Sustainable Global Future / Hermann Scheer, 2004. – 368 с. 2. Основы современной энергетики в 2-х т. М.: МЭИ, 2010. – 646 с. 3. Закон України "Про електроенергетику" / Відомості Верховної Ради України, 1998 р. 4. ЗАКОН № 514-VIII Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії. 2015, № 33. – 324 с. 5. Постанова № 442/28572 «Про внесення змін до Порядку продажу, обліку та розрахунків за електричну енергію, що вироблена з енергії сонячного випромінювання об'єктами електроенергетики (генеруючими установками) приватних домогосподарств», 24.03.2016. 6. Виссаріонов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. "Солнечная энергетика" МЭИ, 2008 год, 317 с. 7. Режим доступу [http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES\\_INSOL\\_M](http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES_INSOL_M) 8. Власова, А. М. Інноваційний менеджмент: [Навчальний посібник] / А. М. Власова, Н. В. Краснокутська. – К.: КНЕУ, 1997. – 92 с. 9. Рудь, Н. Т. Економічне обґрунтування наукових розробок [Навчальний посібник] / Н. Т. Рудь. – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2008. – 196 с. 10. Синадский, В. А. Расчет ставки дисконтирования // «Финансовый директор» № 4, 2003.

Надійшла (received) 05.09.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Економічне обґрунтування встановлення сонячних модулів в приватному домогосподарстві / Д. А. Шокар'ов, В. О. Чорна, К. П. Богодист** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 87 – 92. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household / D. Shokarov, V. Chorna, K. Bogodist** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1253). – P. 87 – 92. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.

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

**Shokarov Dmitro**, PhD. Sc. Associate Professor, Department of Power Stations, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, [shokareff@gmail.com](mailto:shokareff@gmail.com).

**Шокар'ов Дмитро Анатолійович**, канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, [shokareff@gmail.com](mailto:shokareff@gmail.com).

**Chorna Viktoriia**, PhD. Sc. Associate Professor, Electricity consumption systems and power management department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, st. Pershotravneva, 20, 39600, [chornajav@gmail.com](mailto:chornajav@gmail.com)

**Чорна Вікторія Олегівна**, канд. техн. наук, доцент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, вул. Першотравнева, 20, 39600, [chornajav@gmail.com](mailto:chornajav@gmail.com).

**Bogodist Kseniia**, assist., Electricity consumption systems and power management department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, st. Pershotravneva, 20, 39600, [seem@kdu.edu.ua](mailto:seem@kdu.edu.ua)

**Богодист Ксенія Петрівна**, асистент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна, вул. Першотравнева, 20, 39600, [seem@kdu.edu.ua](mailto:seem@kdu.edu.ua).

УДК 621.315

Э. Д. ШУМИЛОВА, Ю.Н. ШУМИЛОВ

**К ВОПРОСУ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ  
В СЕТЯХ 6-10 КВ**

Статья посвящена поиску путей повышения надёжной работы опорно-стержневых изоляторов 6-10 кВ, являющихся одним из элементов массового применения в сетях 6-10 кВ, безотказная работа которых позволит уменьшить потери электроэнергии от перерывов электроснабжения и уменьшит травматизм персонала электрических сетей.

**Ключевые слова:** энергосбережение, электробезопасность, полимерные опорно-стержневые изоляторы, стеклопластиковый стержень, электрическое поле, снижение напряжённости электрического поля.

Стаття присвячена пошуку шляхів підвищення надійної роботи опорно-стержневих ізоляторів 6-10 кВ, що є одним з елементів масового застосування в мережах 6-10 кВ, безвідмовна робота яких дозволить зменшити втрати електроенергії від перерв електропостачання та зменшити травматизм персоналу електричних мереж.

**Ключові слова:** енергозбереження, електробезпека, полімерні опорно-стрижневі ізолятори, склопластиковий стрижень, електричне поле, зниження напруженості електричного поля.

The article is devoted to finding ways to increase the reliable operation of the rod insulators 6-10 kV, which is one of the elements of mass application in networks of 6-10 kV, trouble-free operation that will reduce electricity losses from the interruption of power supply and reduce the injuries of electric networks of staff.

**Keywords:** energy efficiency, electrical safety, polymeric supporting-rod insulators, fiberglass rod, the electric field, the reduction of the electric field.

**Введение.** В электрических сетях среднего напряжения широкое распространение получили опорно-стержневые изоляторы на напряжение 6-10 кВ. К ним можно отнести фарфоровые изоляторы С4-80-III УХЛ1, ИОС 10-500 УХЛ1,Т и др., а также полимерные изоляторы СК-12,5-3,3-80-III, СК-12,5-3,3-80-IV УХЛ1, ОСК-12,5-10/80-2. Данные изоляторы применяются для изоляции и крепления токоведущих частей различного электрооборудования, например, в сборных шинах, токопроводах, разъединителях, электрических аппаратах. Повышение надёжной работы опорно-стержневых изоляторов 6-10 кВ, являющихся одним из элементов массового применения в сетях 6-10 кВ, позволит уменьшить потери электроэнергии от перерывов электроснабжения и уменьшит травматизм персонала электрических сетей.

Опорно-стержневые изоляторы работают в условиях комплексного воздействия эксплуатационных факторов. На них воздействует сильное электрическое поле, кроме этого они в эксплуатации подвергаются тепловым механическим и климатическим воздействиям.

К механическим воздействиям относятся растягивающие, сжимающие, изгибающие и крутящие нагрузки. Например, в нормальном режиме работы разъединителя изоляторы изгибаются под действием динамических сил от тяжения проводов (шин). В режиме короткого замыкания силы электродинамического воздействия резко возрастают и изгибающие моменты увеличиваются. При включении и отключении ножей рубящего типа изоляторы дополнительно подвергаются действию ударных нагрузок. К электрическим воздействиям относится длительное воздействие рабочего напряжения, грозовых и коммутационных перенапряжений. При часто возникающих в сетях 6-10 кВ однофазных

коротких замыканий возможно появление дуговых перенапряжений. Они могут достигать четырёх - пятикратных величин. При неудачно сконструированном полимерном изоляторе может произойти пробой стеклопластикового стержня или границы раздела «стержень – ребро». Пробитый изолятор не всегда можно быстро отыскать для замены.

**Целью настоящей работы** явилось исследование электрического поля в типовых конструкциях опорно-стержневых полимерных изоляторов К-12,5-3,3-80-III, СК-12,5-3,3-80-IV УХЛ1, определение максимальных напряжённостей электрического поля внутри этих изоляторов и корректировка размеров по характеристикам электрического поля с целью повышения надёжности их работы.

**Основной материал исследований.** Ранее в электрических сетях 6-10 кВ традиционно применялись фарфоровые изоляторы типа С4-80-III УХЛ1, ИОС 10-500 УХЛ Т, С 10-80-І УХЛ Т, С 8-80-І УХЛ,Т и др.

Однако, в последнее время на подстанциях и в аппаратах отмечается возросшая потребность полимерных опорно-стержневых изоляторов СК-12,5-3,3-80-III, СК-12,5-3,3-80-IV УХЛ1, ОСК 12,5-10/80-2 и др. по причине их большей стойкости к ударным воздействиям при токах короткого замыкания, поломкам при неправильной работе аппаратов, в частности разъединителей, также при актах вандализма; дополнительно полимерные изоляторы обладают по сравнению с фарфоровыми более высокими разрядными характеристиками при работе в районах с повышенным загрязнением атмосферы. Вид полимерного изолятора приведён на рис.1. Он состоит из стеклопластикового стержня, на который нанесена литьём силиконовая ребристая оболочка и механическим радиальным обжатием закреплены металлические оконцеватели. Данные изоляторы могут

применяться как в сетях 3,3 постоянного тока, так и в сетях 6-10 кВ переменного тока.

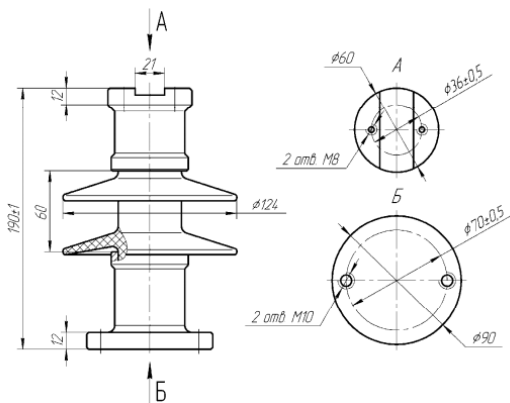


Рис.1. Изолятор СК-12,5-3,3-80-III

Применение силиконовой резины в этих изоляторах позволяет отливать тонкие ребра большого диаметра и, как следствие, получать требуемую длину пути тока утечки при малой изоляционной высоте (кратчайшее расстояние между металлическими оконцевателями). В данном изоляторе изоляционная высота составляет 60 мм. При этом формально все требования к конструкции выполняются и приёмно-сдаточные испытания согласно ТУ на эти изоляторы выдерживают. Однако в эксплуатации при номинальном напряжении 10 кВ имели место отдельные случаи внутреннего пробоя этих изоляторов по границе раздела между стеклопластиковым стержнем и силиконовой оболочкой, что приводило к задержке энергоснабжения потребителя на период поиска пробитого изолятора и его замены.

Для поиска причин внутреннего пробоя изоляторов были выполнены расчёты напряжённости электрического поля внутренней части изолятора СК-12,5-3,3-80-III. Расчёты выполнялись с помощью известной программы Femlab 2.3. [1] при наибольшем рабочем напряжении в сети равном 12 кВ. Высокое напряжение подавали на верхний оконцеватель (фланец), нижний был заземлён. Расчётная модель изолятора приведена на рис.2.(а). Главное внимание при расчётах уделяли наиболее опасным точкам (т.1и т.4), где имели место острые углы оконцевателя, прилегающие к поверхности стеклопластикового стержня; в области этих точек формировалась значительная концентрация электрического поля. При опрессовке оконцевателей наиболее прочное соединение стеклопластикового стержня с оконцевателем получается при достижении радиальной деформации стеклопластикового стержня на величину  $\Delta r$  равной 0,35 мм. [2]. При этом поперечные силы обжатия в зоне острых углов

могут нарушить целостность стекловолокон (их диаметр составляет 5-15 мкм) с образованием разрывов между торцами стекловолокон, в которых при приложении напряжения могут возникнуть частичные электрические разряды. Напряжённость возникновения частичных разрядов в стеклопластиковых стержнях с учётом смятия стеклопластика и разрывов стекловолокон, также при наличии на стенках капилляров в стеклопластике адсорбированных водяных паров может быть ниже 2 кВ/см. [2]. Данное значение напряжённости электрического поля необходимо принять в качестве допустимой величины при конструировании изолятора.

Как следует из график Рис.2 (б) в точках т.1 и т.2 напряжённость электрического поля  $E_{\max}$  больше принятого допустимого уровня возникновения внутренних частичных разрядов. В случае возникновения грозовых, коммутационных или резонансных перенапряжений в сети частичные разряды могут служить инициатором внутреннего электрического пробоя по границе раздела стеклопластика с защитной оболочкой.

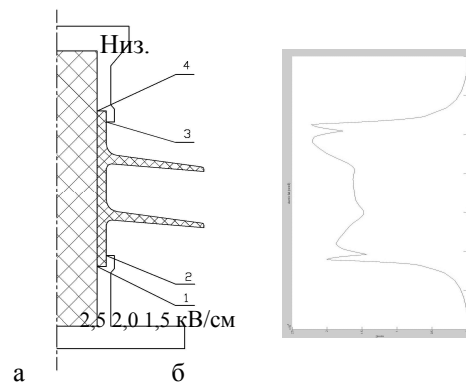


Рис.2. Расчётная модель изолятора СК-12,5-3,3-80-III (а) и график распределения напряжённости электрического поля вдоль конструкции между точками 1 и 2 (б).

Снижение напряжённости электрического поля  $E_{\max}$  можно получить двумя путями: скруглением острых углов в точках 1и 2, а также увеличением изоляционной длины конструкции (расстояние между точками 1и 2). В таблице 1. приведены результаты расчётов  $E_{\max}$  в точках 1и 2 существующего изолятора СК-12,5-3,3-80-III и изолятора со скруглениями в точках 1и 2, а также дополнительно изолятора СК-12,5-3,3-80-IV УХЛ1 с увеличенным изоляционным расстоянием до 104 мм и одним дополнительным ребром. Радиус скругления составлял 3 мм. Нужно отметить, что оба изолятора рекомендованы для применения как на постоянном напряжении 3,3 кВ, так и на переменном номинальном напряжении 6-10 кВ.

Таблица 1

Низ. мм	Расчетные значения $E_{\max}$ в точках 1 и 2, кВ/см			
	3,3 кВ постоянного тока		12 кВ переменного тока	
	Острый угол	Скругление	Острый угол	Скругление
60	0,61*	0,44(38%)	2,20	1,63(35%)
	0,55	0,38(45%)	2,03	1,37(48%)
104	-	-	1,56	1,17(33%)
	-	-	1,40	0,93(50%)

\* В числителе приведены значения для верхнего оконцевателя, в знаменателе - для нижнего оконцевателя

Из таблицы 1 следует, что скругление острых углов в изоляторе, имеющем изоляционную высоту 60 мм, снижает  $E_{\max}$  не менее чем на 33%. а увеличение изоляционной высоты изолятора до 104 мм дополнительно снижает  $E_{\max}$  до 1,17 - 0,93 кВ/см. Оба эти фактора снижают максимальную напряжённость значительно ниже уровня возникновения частичных разрядов, являющихся в дальнейшем инициатором образования на поверхности стеклопластика дефектов типа трековых дорожек - предвестника внутреннего пробоя при ОЗЗ, коммутационных и грозовых перенапряжениях.

#### Выводы:

1. Максимальная напряжённость электрического поля в полимерных опорно-стержневых изоляторах 6-10 кВ с внутренним стеклопластиковым стержнем должна быть менее 2 кВ/см.
2. Снижение максимальной напряжённости в изоляторах с малой изоляционной высотой достигается скруглением острых узлов внутренней части оконцевателей (фланцев) радиусом не менее 3 мм и увеличением изоляционной высоты до 100-105 мм.

3. Опорно-стержневые изоляторы СК-12,5-3,3-80-III не рекомендуется использовать в сетях с напряжением 10 кВ и выше. Вместо них необходимо ставить изоляторы 12,5-3,3-80-IV УХЛ1, имеющих изоляционную высоту 104 мм.

4. Опорно-стержневые изоляторы СК-12,5-3,3-80-III допускается использовать в контактной сети и электрических аппаратах железных дорог при напряжении 3,3 кВ постоянного тока.

#### Список литературы

1. "Femlab 2.3. Руководство пользователя" (перевод с английского с редакторской правкой В.Е.Шмелева). 2. А.К.Шидловский, Ю.Н.Шумилов, А.А.Щерба, В.М.Золотарёв. Высоковольтные полимерные изоляторы. Киев, Издательская группа «Сучасність», 2008, 252с.

#### References (transliterated):

1. "Femlab 2.3. Rukovodstvo pol'zovatelja" (perevod s anglijskogo s redaktorskoj pravkoj V.E.Shmeleva). 2. A.K.Shidlovskij, Ju.N.Shumilov, A.A.Sherba, V.M.Zolotarjov. Vysokovol'tnye polimerory. Kiev, Izdatel'skaja gruppya «Suchasnist'», 2008, 252s.

Надійшла (received) 18.04.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**До питання енергозбереження та підвищення електробезпеки в мережах 6-10 кВ/ Е. Д. Шумілова, Ю. М. Шумілов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 93 – 95. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**К вопросу энергосбережения и повышения электробезопасности в сетях 6-10 кВ/ Э. Д. Шумілова, Ю. М. Шумілов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 93 – 95. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.

**To the question of energy saving and increase electrical safety in network 6-10 kV / E. D. Shumilova, Y. N. Shumilov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1253). – P. 93 – 95. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.

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

**Шумілова Емілія Дмитрієвна** – кандидат технічних наук, доцент, Донбаський державний педагогічний університет, м.Слов'янськ; тел. : 0958874036

**Шумілова Эмилия Дмитриевна** – кандидат технических наук, доцент, Донбасский государственный педагогический университет, г.Славянск; тел.: 0958874036.

**Shumilova Emilia Dmitrievna** - Ph.D., Associate Professor, Donbassky State Pedagogical University, Slavyansk; tel. : 0958874036.

**Шумілов Юрій Миколайович** – доктор технічних наук, професор, заст. директора ПАТ «Слов'янський завод високовольтних ізоляторів», м.Слов'янськ; тел.: 0951813515; e-mail «shumilov3@yandex.ru».

**Шумілов Юрий Николаевич** – доктор технических наук, профессор, зам. директора ПАО «Славянский завод высоковольтных изоляторов», г.Славянск; тел.: 0951813515; e-mail «shumilov3@yandex.ru».

**Shumilov Yuri Nikolayevich** - doctor of technical sciences, professor, deputy. Director- «Slavyansk factory of high-voltage insulators", Slavyansk; Tel. : 0951813515; e-mail «shumilov3@yandex.ru».



УДК 621.314

**О.В. ШУТЕНКО**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»**АНАЛИЗ ГРАФИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ ПОСТРОЕННЫХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ХАРГ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДЕФЕКТОВ**

В статье выполнены исследования графических образов, построенных по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов, по 1167 единицам высоковольтного маслонаполненного оборудования с разными типами дефектов. По результатам анализа установлено, что даже при одном и том же дефекте, графические образы могут существенно отличаться. Для учета данного обстоятельства, предложено использовать не строго фиксированные графические образы, а диапазоны значений координат графических образов, которые получены для дефектов разного типа. Построенные по результатам анализа образы, позволяют значительно расширить базу эталонных образов, что позволит распознавать большее число дефектов, особенно это касается перегревов в диапазоне низких и средних температур, а также комбинированных дефектов, для которых газом с максимальной концентрацией является этан.

**Ключевые слова:** хроматографический анализ растворенных в масле газов, дефект, графический образ дефекта, газосодержание проб масел, частичные разряды, искрение, дуговые разряды, перегревы.

У статті виконані дослідження графічних образів, побудованих за результатами хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів, по 1167 одиницям високовольтного маслонаповненого устаткування з різними типами дефектів. За результатами аналізу встановлено, що навіть при тому самому дефекті, графічні образи можуть суттєво відрізнятися. Для обліку даної обставини, запропоновано використовувати не строго фіксовані графічні образи, а діапазони значень координат графічних образів, які отримані для дефектів різного типу. Побудовані за результатами аналізу образи, дозволяють значно розширити базу еталонних образів, що дозволить розпізнавати більше число дефектів, особливо це стосується перегрівів у діапазоні низьких і середніх температур, а також комбінованих дефектів, для яких газом з максимальною концентрацією є етан.

**Ключові слова:** хроматографічний аналіз розчинених у маслі газів, дефект, графічний образ дефекту, вміст газів в пробах масел, часткові розряди, іскріння, дугові розряди, нагрівання.

The article made the study of graphic images, built on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil at 1167 units of high-voltage oil-filled equipment with different types of defects. The analysis found that even with the same defect, graphic images may differ materially. To account for this fact, it is proposed to use not strictly fixed symbols and graphic images ranges of coordinate values, which are obtained for different types of defects. Built on the analysis of images, can significantly expand the base master images, which will identify a greater number of defects, especially overheating in the range of low and medium temperature and combined defects for which the gas with the maximum concentration is ethane.

**Keywords:** chromatographic analysis of gases dissolved in oil, defect, a graphic image of the defect, the gas content of samples of oils, partial discharge, arcing, arcs, overheating.

**Постановка проблемы.** Обеспечение требуемого уровня надежности высоковольтного маслонаполненного электроэнергетического оборудования, особенно за пределами нормативного срока службы, является актуальной и практически значимой задачей. Ее решение подразумевает как усовершенствование уже существующих методов диагностики, так и разработку, и внедрение новых. Одним из методов неразрушающего контроля, который позволяет выявлять и распознавать большинство возможных дефектов оборудования является хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ). Данный метод нашел широкое применение, как в Украине, так и за рубежом. Однако, несмотря на широкое распространение, и достаточно большой опыт практического применения ХАРГ, имеют место существенные различия в критериях, используемых различными национальными и ведомственными стандартами [1], для интерпретации результатов анализа. Наиболее остро эти различия проявляются при распознавании типа прогнозируемого дефекта, что может привести к постановке ошибочного диагноза. В связи с этим усовершенствование методов распознавания типа дефекта по результатам ХАРГ, представляет практический интерес.

**Анализ публикаций.** Распознавание типа дефекта, по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов, является важным этапом процедуры принятия решения о возможной дальнейшей эксплуатации оборудования. В настоя-

щее время для распознавания типа дефектов используются как значения отношений пар газов, так и графические методы распознавания. Выполненные в работах [2, 3] исследования показали, что функции плотностей распределений отношений пар газов, которые получены для дефектного и бездефектного состояний пересекаются, а, следовательно, существует вероятность принятия ошибочных решений при распознавании типа дефекта. Как показано в [4] значения отношений пар газов для дефектного состояния могут выходить за границы областей, характерных для заданного типа дефекта. В работе [5] выполнен анализ основных графических методов интерпретации ХАРГ, рассмотрены способы представления, и значения координат, используемые для графического отображения диагностируемого объекта. Одним из наиболее распространенных и простых по реализации, графических методов распознавания типа дефектов являются графические образы. Суть метода состоит в том, что в пробе масла определяется газ с максимальной концентрацией, далее рассчитываются величины отношений каждого газа к газу, имеющему наибольшую концентрацию. Строят график образа дефекта, на котором по оси абсцисс размещают газы строго в следующем порядке:  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ , а по оси ординат откладывают вычисленные отношения для каждого из этих газов. Полученные точки соединяют линией. Сравнивают полученный график с эталонными образцами и выбирают тот, где достигается

максимальное совпадение. Этот образ и определяет вид дефекта. Эталонные образы, соответствующие дефектам разного типа, как правило, приведены в национальных или ведомственных стандартах по интерпретации результатов ХАРГ, например в [6, 7]. Выполненный в работе [8], сравнительный анализ достоверности распознавания типа дефекта показал, что одним из существенных недостатков данного метода является ограниченное число эталонных образцов, что затрудняет распознавание многих типов дефектов. Для устранения данного недостатка был выполнен анализ графических образов, построенных по результатам эксплуатационного контроля газосодержания масла в трансформаторах с различным типом дефектов. Ниже приведены результаты этого анализа.

**Цель статьи** – В статье приведены результаты анализа графических образов дефектов, построенных по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов по 1167 единицам оборудования с различными типами дефектов.

**Метод решения.** Для исследования графических образов в дефектном высоковольтном оборудовании были использованы результаты хроматографического анализа растворенных в масле газов по 1167 единицам оборудования с четко установленным (верифицированным) типом дефекта. Используемые данные получены как в результате сотрудничества авторов с энергетическими компаниями Украины, так и из открытых литературных источников.

**Графические образы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтного оборудования, в котором было выявлено образование Х-воска.** В настоящее время образование воскообразных продуктов на поверхности или между слоями изоляционной бумаги является достаточно распространенным дефектом высоковольтных маслонаполненных вводов, трансформаторов тока и трансформаторов напряжения [9-12]. Имеющиеся в распоряжении автора результаты ХАРГ для оборудования с Х-воском, позволили выделить 5 групп графических образов, которые характерны для данного типа дефекта. Данные образы приведены на рис. 1. Из всех образов, построенных по результатам ХАРГ у которого выявлено отложение Х-воска, наиболее часто встречаются, образы, приведенные на рис. 1 (а, б). Согласно [6, 7] данные образы соответствуют частичным разрядам. Следует отметить, что эти образы построены по результатам ХАРГ, как для вводов герметичного и негерметичного исполнения, так и для трансформаторов тока и напряжения. Особенностью газосодержания оборудования с таким дефектом является преобладающее содержание водорода от 70 до 98%. Содержание остальных газов варьируется в следующих пределах: метана до 26%, этана до 9%, этилена до 1%, ацетилен, как правило, отсутствует.

Наиболее близкими графическими образами дефектного состояния, которые регламентированы в [6, 7], для образов второй группы рис. 1 (в, г) явля-

ются образы соответствующие низкотемпературному перегреву, переходящему в разряды. В пробах масел оборудования, по которым построены образы, приведенные на рис. 1 (в, г), содержание водорода составило 15-25%, метана 65-85%, этана 3-12% этана. Содержание этилена не превышает 1%, ацетилен, как правило, отсутствует. Результаты вскрытия вводов, с результатами ХАРГ, по которым построены такие образы, показывают либо наличие небольшого количества Х-воска (рис. 1 в), либо (рис. 1 г) отложения Х-воска на ближайших к токоведущей трубе слоях бумаги по всей высоте изоляционного остова, и следы частичных разрядов на  $\frac{1}{4}$  высоты остова [9]. Графические образы, приведенные на рис. 1 (д-з), не регламентированы в действующих нормативных документах по интерпретации результатов ХАРГ. При вскрытии оборудования с результатами ХАРГ, которым соответствуют приведенные образы, выявлено как значительное так и незначительное отложение Х-воска [10]. Основной особенностью газосодержания данного оборудования является значительное содержание водорода и этана. Так содержание водорода составляет 25-55%, этана 25-65%, метана 5-30%. Как и в предыдущих случаях, содержание этилена и ацетилена крайне мало и не превышает 0,5%. Образы, приведенные на рис. 1 (и-к) также, не регламентированы в [6, 7]. Данные образы построены по результатам ХАРГ высоковольтных вводов герметичного исполнения, в которых обнаружены существенные отложения Х-воска. Так при вскрытии высоковольтного ввода ГМТБ-2200/1000 зав. черт. 086 выпуска 1983, зав. № Т-13896, 30.07.02 было выявлено отложения Х-воска на ближайших к токоведущей трубе слоях бумаги по всей высоте изоляционного остова. Кроме того обнаружены продукты разложения масла в виде вязкой черной массы. На разрезных металлических фланцах прессующих устройств в местах касания прессующих винтов имеется небольшой черный налет [9]. Газосодержание масел таких вводов отличается повышенным содержанием водорода и метана, а в некоторых образцах (рис 1 и) и этилена. Так содержание водорода находится на уровне 40-60%, метана 35-45%, содержание этана не превышает 10%, а содержание этилена может достигать и 15%. Ацетилен, как правило, отсутствует, или находится в незначительных количествах. Выполненный анализ литературных источников, позволил установить, что образы сходные, с образами приведенным на рис. 1 (и) и 1 (к), могут быть получены по результатам ХАРГ оборудования, в котором выявленные дефекты не связаны с образованием Х-воска. Так в работах [13-17] приведены результаты ХАРГ оборудования с низкотемпературными перегревами и блуждающими токами в обмотках. Графические образы, построенные по этим результатам, имеют сходство с образом на рис. 1 (и). Графические образы с рис. 1 (л, м) также не регламентированы в действующих нормативных документах. Однако в [6], в качестве примера использования графических образов для распознавания типа дефектов, приведен

схожий образ для высоковольтного ввода с разрядами которые сопровождаются перегревами. Пробы масла из оборудования с такими образами содержат 55-75% водорода, 20-35% метана, до 15% этана. Содержания этилена и ацетилена незначительны и не превышают 0,5%. Образ, приведенный на рис. 1

(н) соответствует дуговому разряду. Он был построен по результатам ХАРГ для высоковольтного ввода ГБМТ-45-220/2000, залитого маркой ГК [9]. По результатам вскрытия ввода выявлено наличие небольшого количества X-воска на 1-3 уравнивающих обкладках на холодной части линейного ввода.

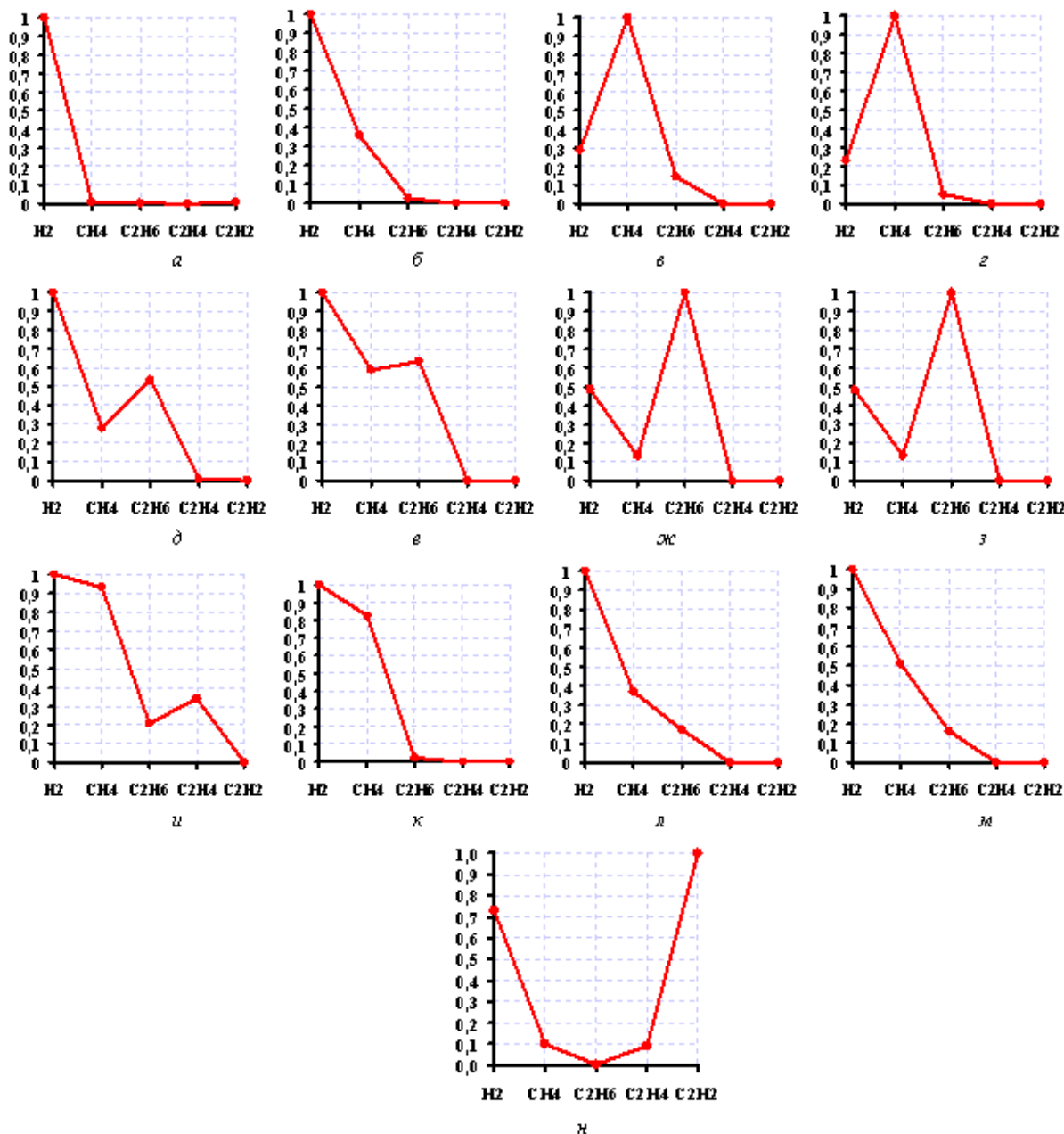


Рис. 1 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ оборудования в которых был выявлен X-воск

Анализируя полученные результаты, следует констатировать, что образы, построенные по результатам ХАРГ оборудования, в котором выявлено образование воскообразных продуктов, соответствуют образам, характерным для таких дефектов как перегревы в диапазоне низких температур, перегревы в диапазоне низких температур сопровождающиеся разрядами, а также частичные разряды и даже разряды большой энергии.

**Графические образы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтного оборудо-**

**вания, в котором были выявлены частичные разряды.** В [6,7] для распознавания частичных разрядов регламентирован 1 образ, в котором газом максимальной концентрацией является водород. Однако выполненный анализ результатов ХАРГ для оборудования, в котором были выявлены частичные разряды, позволил установить, что в зависимости от интенсивности разрядов, их локации и ряда других факторов, графические образы могут существенно отличаться. На рис. 2 приведены наиболее характерные образы, построенные по

результатам ХАРГ оборудования с частичными разрядами. Как показал выполненный анализ основной причиной выявленных отличий между графическими образами, является различное содержание газов, в пробах масла. На рис. 2 (а-е), приведены образы, построенные по результатам ХАРГ оборудования, в

котором выявлены коронные разряды в масле. Следует отметить, что подобные образы можно построить по результатам ХАРГ, приведенным в работе [18], которые получены в результате лабораторного моделирования электрических разрядов различной интенсивности.

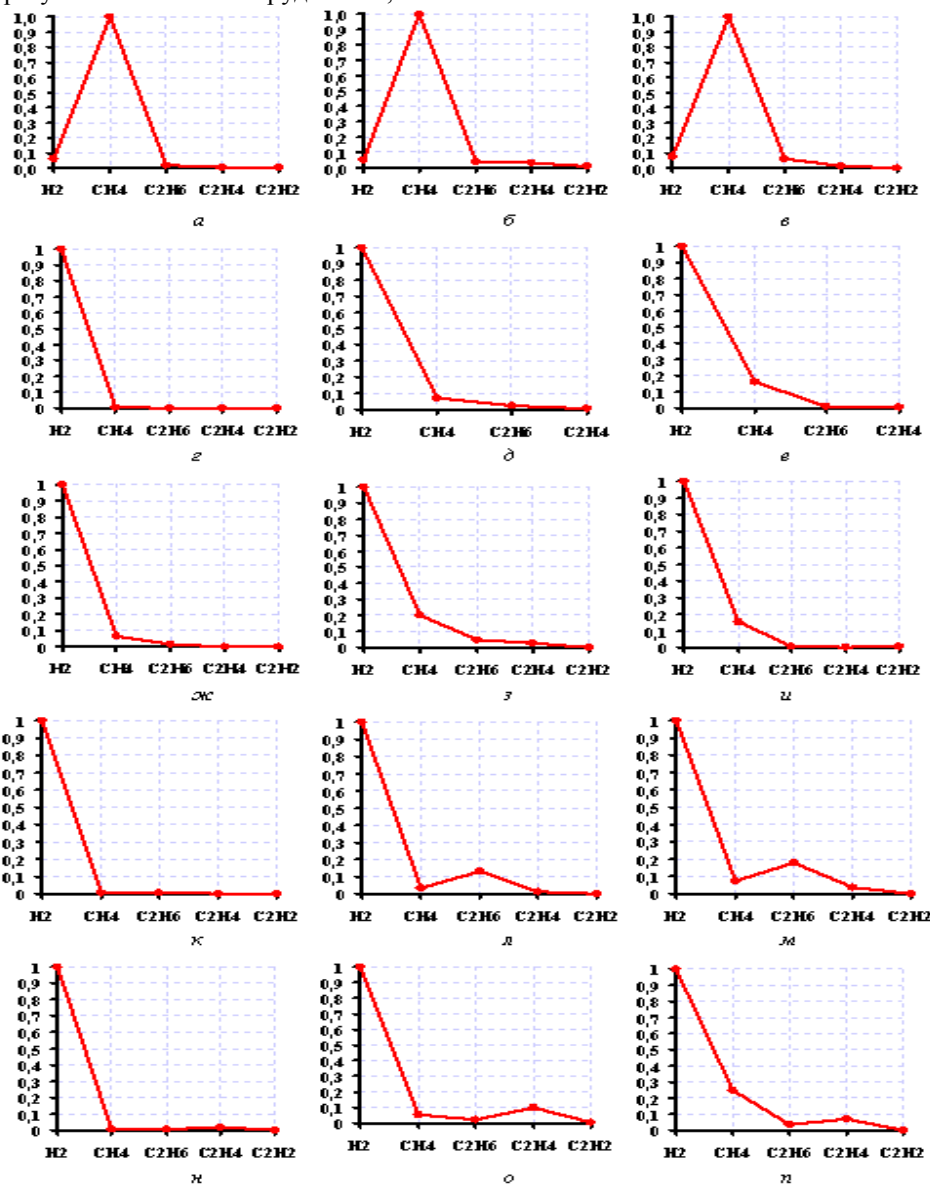


Рис. 2 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ оборудования в которых были выявлены частичные разряды

Также подобные образы могут быть построены по результатам ХАРГ действующего оборудования [16, 18]. Характерной особенностью проб масел, соответствующих образам с рис. 2 (а-в), является высокое содержание метана от 80 до 95%, относительно низкое содержание водорода до 10%, содержание этана находится в пределах от 1 до 18%, этилена от 0,1 до 3%, ацетилен либо отсутствует, либо не превышает 1% от общего газосодержания.

Анализ результатов причин повреждения оборудования, показал, что образы, приведенные на рис. 2 (г-е) соответствуют разрядам в масле, коронным разрядам и частичным разрядам низкой интенсивности. Приведенные на рисунке образы в основ-

ном характерны для высоковольтных вводов и трансформаторов тока [9,12,19], однако образ, приведенный на рис. 2(е) построен по результатам ХАРГ автотрансформатора АОДЦТН 417000/500. Как правило, такие разряды не оставляют следов на поверхности основной изоляции, в связи с чем возникают сложности при их идентификации при вскрытии оборудования. Особенностью газосодержания масел в оборудовании с таким видом дефектов является подавляющее содержание водорода по сравнению с остальными газами. В анализируемом оборудовании содержание водорода

составило 85-99%, метана до 14%, содержание этана и этилена не превышает 2%, и менее 0,008% ацетилен. Достаточно интересным является то, что максимальные значения содержания водорода (от 93 до 99%) и как следствие минимальные значения содержания углеводородов (метан до 6%, этан до 1,5%, этилен до 1%) наблюдается в высоковольтных вводах герметичного исполнения. В трансформаторах тока содержание водорода находится на уровне 89-93%, метана от 5 до 9%, этана до 2%, этилена до 1%.

В силовых трансформаторах содержание водорода находится в пределах 75-85%, метана 5-13%, этана до 3%, и менее 1% этилена. Во всем проанализированном оборудовании при данном типе дефекта содержание ацетилен не превышает 0,01%

На рис. 2 (ж-и) приведены графические образы, построенные в основном для оборудования в которых выявлены ЧР в бумажной изоляции. Кроме того как по внешнему виду, так и по особенностям газосодержания данные образы совпадают с образцами, полученными для отложения Х-воска (рис. 1 а-б). Анализируя содержание газов в данном оборудовании, следует отметить более заметное увеличение содержания метана и этана по отношению к водороду. Так содержание водорода находится в пределах от 64 до 92%, метана от 6 до 20%, этана до 15%. Содержание предельных углеводородов (этилена и ацетилен) в пробах масла данного оборудования также повышается ( $C_2H_4$  до 10% , а  $C_2H_2$  до 2%).

В некоторых зарубежных источниках [20-22] приводятся результаты ХАРГ оборудования, в котором, по мнению авторов, обнаружены частичные разряды. Графические образы, построенные по этим результатам, приведены на рис. 2 (к-м). Как видно из рисунков для данного оборудования имеет место более высокое содержание этана по сравнению с содержанием метана и этилена. Газом с максимальной концентрацией в этом оборудовании остается водород. Его содержание варьируется на уровне 70-99%. Содержание метана составляет от 0,1 до 7%, этана от 0,4 до 20%, этилена от 0 до 6%, а ацетилен не менее 0.1%.

Достаточно интересными являются графические образы, приведенные на рис. 2 (н-п). Отличительной особенностью этих образов является превышение содержанием этилена над содержанием этана. В некоторых пробах содержание этилена даже превышает содержание метана. В работе [18] подобное газосодержание связывается с развитием коронного разряда в пузырьках воздуха. В работе [23], близкие по форме образы получены для шунтирующих реакторов, а полученное содержание газов связывается с разложением масла под действием ультразвуковой кавитации. В тоже время графические образы, построенные по результатам лабораторных исследований по воздействию ультразвуковой кавитации на трансформаторные масла [24] не совпадают с образцами с рис. 2 (н-п). В некоторых зарубежных источниках [13, 25], оборудова-

нию с результатами ХАРГ, дающими аналогичные образы был поставлен диагноз – частичные разряды. А образ, приведенный на рис. 2 (н), построен по результатам ХАРГ, для высоковольтного ввода ГМТА-45-110/630-Y1 в котором выявлены частичные разряды высокой интенсивности (кажущийся заряд составил 12 нКл). Содержание водорода в таком оборудовании находится в пределах от 70 до 98%, метана до 20%, этана до 7%, этилена до 15%, ацетилен до 5%.

Следует отметить, что по мере роста энергии разрядов, форма графических образов остается практически неизменной, но процентное газосодержание проб масел несколько изменяется. В качестве примера на рис. 3, приведены графические образы, которые построены по результатам ХАРГ оборудования, которые приведены в работах [19, 21, 22, 27-30].

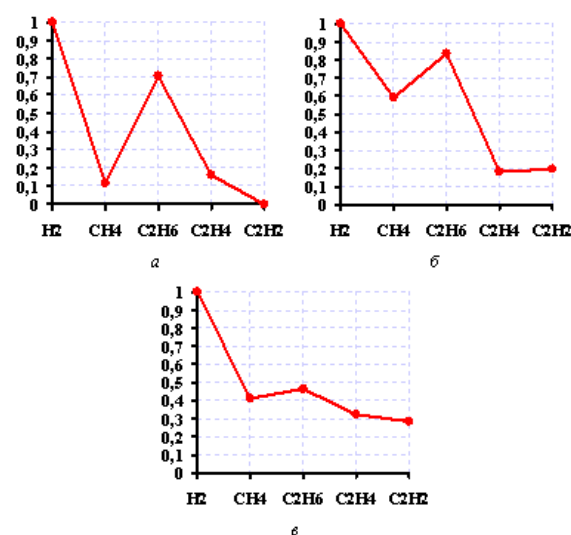


Рис. 3 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ оборудования в которых были выявлены интенсивные частичные разряды

Так образ, приведенный на рисунке 3 (а), построен по результатам ХАРГ трансформатора тока, в котором по данным [19] выявлены интенсивные ч.р. Согласно [27] образ, приведенный на рис. 3 (б) соответствует электрическим разрядам малой энергии. А результаты ХАРГ, по которым построен образ с рис. 3 (в), в работе [28], были интерпретированы как дуговой разряд. Внешне эти образы достаточно близки к образам, приведенным на рис. 2 (к-м). Однако содержание газов в таком оборудовании характеризуются значительным снижением содержания водорода до уровня 30-70%, и увеличением содержания углеводородов: метана до 30%, этана 15-40%, этилена до 20% и ацетилен до 15% от общего газосодержания.

Таким образом графические образы построенные по результатам ХАРГ высоковольтного оборудования для одного и того же типа дефекта могут существенно отличаться. Основными причинами подобных отличий является энергия, выделяемая

при развитии дефекта, тип оборудования, сорт масла и ряд других факторов.

**Графические образы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтного оборудования, в котором выявлены частичные разряды высокой интенсивности.** В настоящее время в [6] отсутствует градация частичных разрядов по уровню энергии, в то время как в [7] различают частичные разряды низкой и высокой плотности энергии. Как правило, в литературе частичные разряды с высокой плотностью энергии, называют критическими разрядами. Наиболее характерные образы, построенные по результатам ХАРГ оборудования с критическими частичными разрядами, приведены на рис. 4.

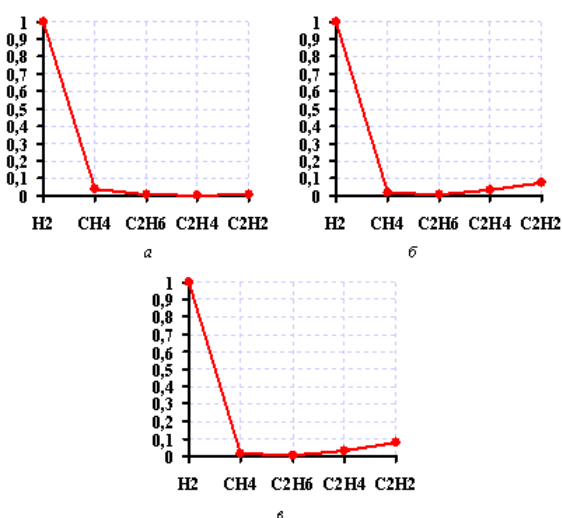


Рис. 4 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ оборудования в которых были выявлены критические частичные разряды

Характерной особенностью газосодержания оборудования при таких дефектах является незначительное превышение содержания ацетилена над содержанием этилена. Содержание водорода в таких трансформаторах составляет от 85 до 95%, метана от 1 до 8%, этана и этилена до 3%, ацетилена до 7%.

**Графические образы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов у которых выявлены искровые и ползучие разряды.** В большинстве известных методик по интерпретации результатов ХАРГ [6, 7] для распознавания и искровых и ползучих разрядов предлагается использовать один образ. Выполненные исследования показали, что в зависимости от интенсивности, стадии развития процесса и других факторов образы, построенные по результатам ХАРГ для трансформаторов у которых выявлены искровые и ползучие разряды, существенно отличаются. Эти образы приведены на рис. 5. Следует обратить внимание на существенное отличие образов с рис. 5 (а-е), от образов, приведенных на рис. 5 (ж-м).

Образ, приведенный на рисунке рис. 5 (а) построен по результатам ХАРГ трансформатора ТДЦ 400000/330. В данном трансформаторе обнаружены следы разряда и выгорание магнитопровода. Образ на рис. 5 (б), получен по результатам ХАРГ трансформатора ТРДНС 25000/35, в котором выявлены разряды и перегрев болтового соединения контактора. Образ, приведенный на рис. 5 (в), соответствует выгоранию изоляции шпилек, из-за касания стягивающих шпилек консоли, и выгорание металла шпильки в трансформаторе ОДТГА- 80000/220. Образы, приведенные на рис. 5 (г и е), построены по результатам ХАРГ трансформатора ТДТНГ-110/35/6 и автотрансформатора АТДЦТГУ-120000/220, в которых имело место ослабление гайки на выводе обмотки НН со шпилькой ввода. Основными отличиями газосодержания проб масел из трансформаторов, у которых были выявлены данные дефекты, являются содержание водорода на уровне 30-75%, метана 2-32%, этана до 11%, этилена от 5-38%, и более высокое, по сравнению с предыдущими дефектами содержание ацетилена до 12%.

Графические образы, приведенные на рис. 5 (ж-м) построены по результатам ХАРГ трансформаторов, в которых выявлены разряды более высокой мощности. При анализе данной группы графических образов выявлено некоторые несоответствия с диагнозами, поставленными в некоторых литературных источниках. Так в работе [31], приведены результаты ХАРГ для автотрансформатора 330 кВ, которые, по мнению автора, соответствуют дуговому разряду. Однако и отношения пар газов ( $C_2H_2/C_2H_4=0,982$ ;  $CH_4/H_2=0,317$ ;  $C_2H_4/C_2H_6=7,667$ ) и графический образ дефектов (рис. 5 ж) соответствуют ползучему разряду. Образ, приведенный на рисунке 5 (з) построен по результатам ХАРГ для автотрансформатора АТ-1 220 кВ, ПС Буран от 13.05.2000 г., и, по мнению авторов [32] соответствует электрическим разрядам большой мощности. Рассчитанные значения отношений пар газов составили  $C_2H_2/C_2H_4=0,742$ ;  $CH_4/H_2=0,310$ . Отношение  $C_2H_4/C_2H_6$  не было рассчитано, т.к. концентрация этана не превысила предела обнаружения хроматографа. Полученные значения отношений, а также графический образ свидетельствуют о ползучем разряде высокой интенсивности. Образ, приведенный на рис. 5 (и), построен по результатам ХАРГ для автотрансформатора АОДЦТН 333000/750 [6] в котором выявлены следы искровых разрядов на изоляции магнитных шунтов, системы шунтирования бака автотрансформатора. В блочном трансформаторе 320 мВА 220/15,75 [33] по результатам акустического обследования и ХАРГ был выявлен устойчивый развитый частичный разряд (амплитудой до 70 тыс. пКл), с перекрытием по поверхности твердой изоляции. Данный разряд является критическим с возможным переходом в пробой. Данному дефекту соответствует образ, приведенный на рис. 5 (к).

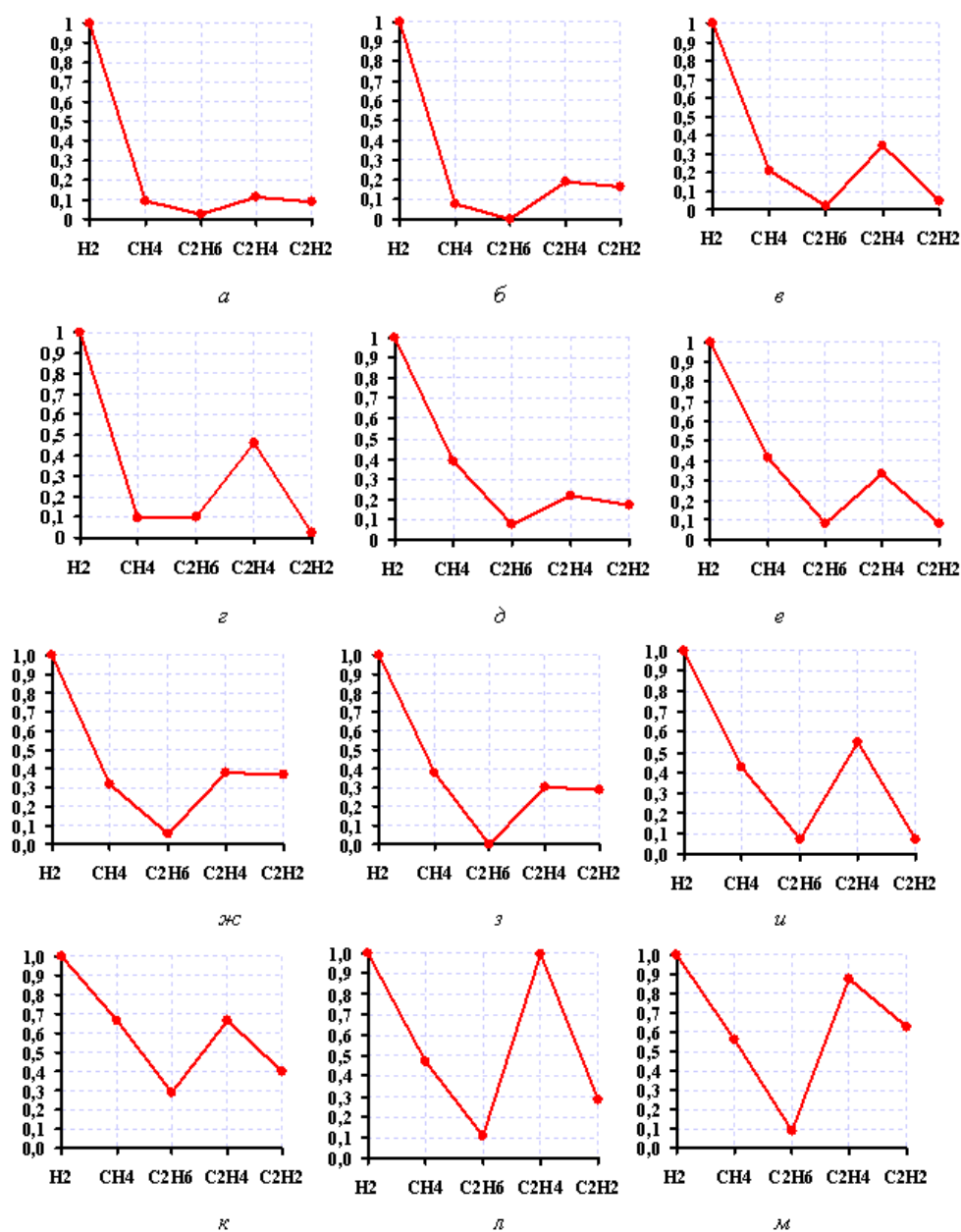


Рис. 5 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов в которых были выявлены искровые и ползучие разряды

В трансформаторе напряжением 35 кВ [34] по результатам ХАРГ был обнаружен искровой разряд высокой интенсивности. При вскрытии трансформатора было обнаружено: на фазе «С» обмотки ВН механический надлом перехода «медь - алюминий» на выходе отвода из обмотки. Соответствующий образ приведен на рис. 5 (л). Разветвленные следы ползучих разрядов на поверхности и в толщине основной изоляции были выявлены в автотрансформаторе АОДЦН 417000/750 [6]. Графический образ данного дефекта приведен на рис. 5 (м). Данные дефекты характеризуются содержанием водорода от 25-78%, метана 5-30%, этана до 15%, этилена 10-30% (в ряде трансформаторов содержание этилена и водорода совпадают, а в некоторых этилен является

ключевым газом) и ацетилена до 25%.

**Графические образы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов у которых выявлены разряды малой энергии.** В действующем в Украине нормативном документе по интерпретации результатов ХАРГ [6], отсутствуют эталонные образы, соответствующие разрядам малой энергии, хотя значения отношений пар газов для данного типа дефекта приводятся. Согласно [6] для разрядов малой энергии характерны следующие значения отношений пар газов:  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ ,  $0,1 < CH_4/H_2 < 0,5$ ,  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ . Графические образы, построенные по результатам

ХАРГ с соответствующими значениями отношения пар газов, приведены на рис. 6. Следует отметить, что в зависимости от используемой методики, такого рода дефекты интерпретируются либо как разряды большой мощности, либо как критические частичные разряды. В некоторых работах, например в [31] данные разряды классифицируются как дуговые. Для данного типа дефектов содержание водорода находится в пределах от 40 до 80%, метана от 4 до 25%, этана до 10%, этилена до 11%, а ацетилена от 5 до 30%

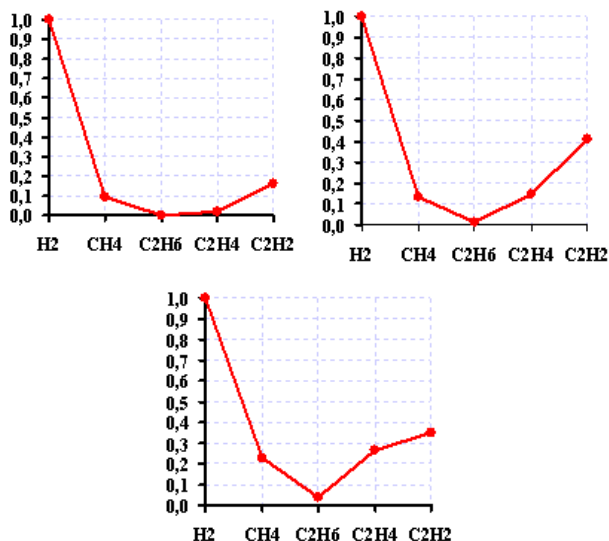


Рис. 6 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов в которых были выявлены разряды большой энергии

При анализе результатов ХАРГ для оборудования с различными типами дефектов, были выявлены некоторые результаты, интерпретация которых вызвала определенные затруднения. Для таких дефектов значения отношения этилена к ацетилену значительно превышает 1, значения отношения метана к водороду находится в пределах от 0,1 до 0,9, а вот отношение этилена к этану меньше 1. В [6 и 7], отсутствует тип дефекта, для которого характерна данная комбинация отношений пар газов. На рисунке 7 приведены графические образы, построенных по результатам ХАРГ трансформаторов, у которых были выявлены такого рода дефекты. Образ, приведенный на рис.7 (а) построен по результатам ХАРГ для трансформатора напряжением 125 кВ, гидроэлектростанции "Nelson river", Северная Канада [35]. Данный трансформатор был изготовлен в 1977 г. и работал на 75% мощности. Повреждение в августе 1998 года. Причиной выхода трансформатора из строя

являлось повреждение изоляции между катушками и витковой изоляцией. Данный образ построен по результатам анализа, взятого сразу же после повреждения. Аналогичный образ построен по результатам ХАРГ, приведенным в [36], из данного источника следует, что в трансформаторе были выявлены мощные электрические разряды.

Графический образ, приведенный на рис. 7 (б), построен по результатам ХАРГ трансформатора ТДТН-40/110/35/6. По результатам вскрытия в данном трансформаторе выявлены повреждения изоляции, наличие поверхностных разрядов на барьерах на обмотке ВН. В работе [28] для трансформатора, по результатам ХАРГ которого построен образ, приведенный на рис. 7 (в), был поставлен диагноз дуговой разряд. А образ, приведенный на рис. 7 (д), построен по результатам ХАРГ трансформатора [37] который был поврежден в феврале 1996 г. Аналогичный образ был построен и по результатам ХАРГ приведенными в [38]. В данном оборудовании содержание водорода составляет от 40 до 65%, метана от 5 до 18%, этана от 2 до 10%, этилена от 12 до 25%, ацетилена от 10 до 22%.

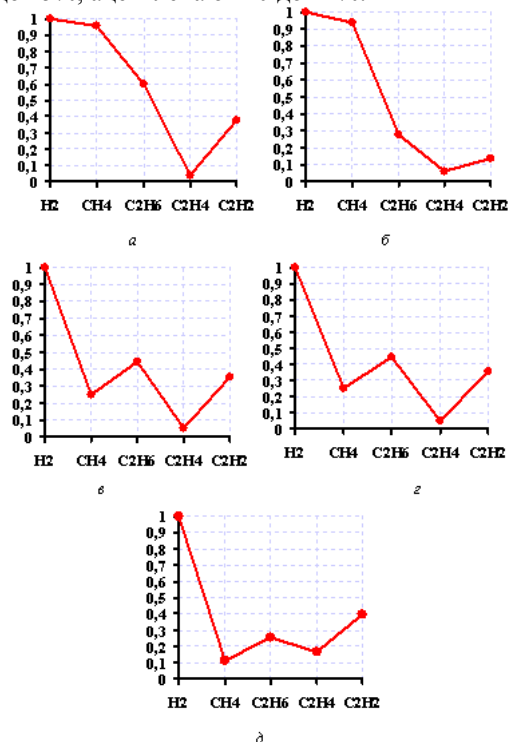


Рис. 7 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов в которых были выявлены разряды малой энергии

**Графические образы, соответствующие дуговым разрядам.** Графические образы, наиболее характерные для дуговых разрядов, приведены на рис. 8. В зависимости от типа оборудования, стадии развития дефекта и других факторов основными особенностями газосодержания масел, силовых



трансформаторов при дуговых разрядах являются: содержание водорода от 30 до 80%, метана от 1 до 18%, этана до 11%, этилена от 1 до 25%, а ацетилена от 10 до 40%.

Анализируя процентное содержание газов для различных типов электрических разрядов, для которых газом с максимальной концентрацией является водород, следует отметить, что по мере роста энергии разряда процентное содержание водорода в пробах масла снижается. В тоже время графические образцы, не отображают данную особенность.

**Графические образцы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов у которых выявлены разряды большой энергии (ключевой газ ацетилен).** В настоящее время в большинстве известных методиках для электрических разрядов большой мощности, для которых газом с максимальной концентрацией является ацетилен, регламентирован, только один образ, соответствующий дуговому разряду. Однако выполненные исследования показали, что для таких разрядов и содержание газов в пробах масла и соответственно графические образцы дефектов могут существенно отличаться.

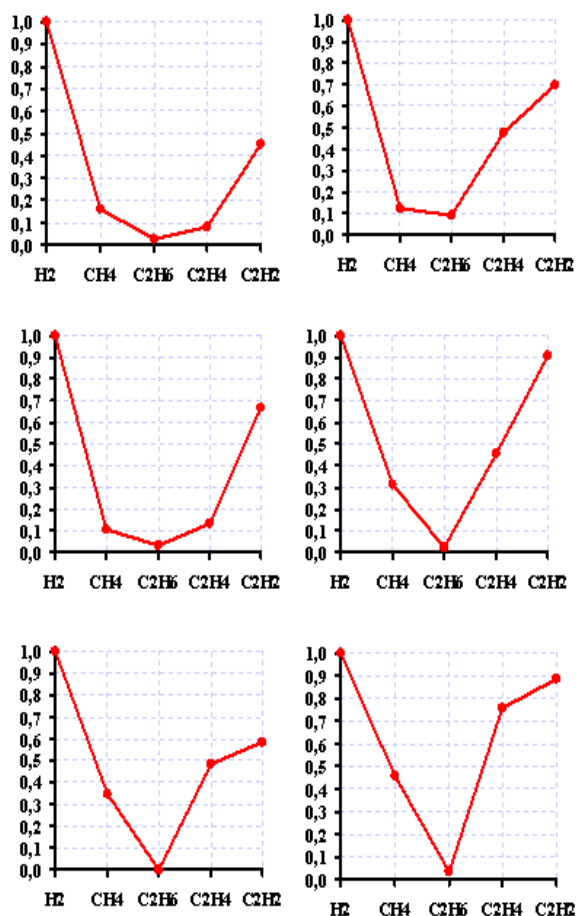


Рис. 8 – Графические образцы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов в которых были выявлены дуговые разряды

Так на рис. 9 приведены графические образцы, построенные по результатам ХАРГ маслонаполнен-

ного оборудования у которого обнаружены электрические разряды высокой энергии, а газом с максимальной концентрацией являлся ацетилен. Несмотря на то, что данные образцы были построены по результатам ХАРГ для различного оборудования (автотрансформаторы, трансформаторы, высоковольтные вводы, трансформаторы тока и трансформаторы напряжения) [18, 21, 32, 39, 40] и в результате разрядов были повреждены различные участки, во всех без исключения протоколах осмотра имела место заключение «следы разрядов и выгорания изоляции». Помимо указанной особенности приведенные образцы объединяет еще одно обстоятельство: подавляющее превышение содержания непредельных углеводородов (особенно ацетилена) над предельными углеводородами и водородом. Так максимальное содержание водорода не превышало 10%, метана 12%, этана 13%, содержание этилена находилось в пределах от 4 до 45%, а ацетилена от 45 до 93%

Следующая группа образцов, характерна для электрических разрядов большой энергии, для которых газом с максимальной концентрацией является ацетилен, приведена на рис. 10. Образ, приведенный на рис. 10 (а), построен по результатам ХАРГ трансформатора мощностью 66 кВА и напряжением 11 кВ, от 02.05.2010 [41]. В данном трансформаторе были выявлены электрический разряд высокой энергии. Образ на рис. 10 (б), построен по результатам ХАРГ приведенным в [18] с диагнозом искрение между пружинами контактов РПН. В трансформаторе ОЦГ 135000/500, по результатам ХАРГ, которого построен образ на рис. 10 (в), при вскрытии было обнаружено следы разрядов и выгорание изоляции. Для таких образцов содержание водорода составило до 20%, метана 3-20%, этана 10-35%, этилена до 20%, а ацетилена 20-70%. Следует отметить, что данные образцы в некоторой мере является схожим с образцами, приведенным на рис. 7 (в-д). Отличие заключается в том, что в образцах на рис. 10, газом с максимальной концентрацией является ацетилен, а в образцах на рис. 7 (в-д) – водород.

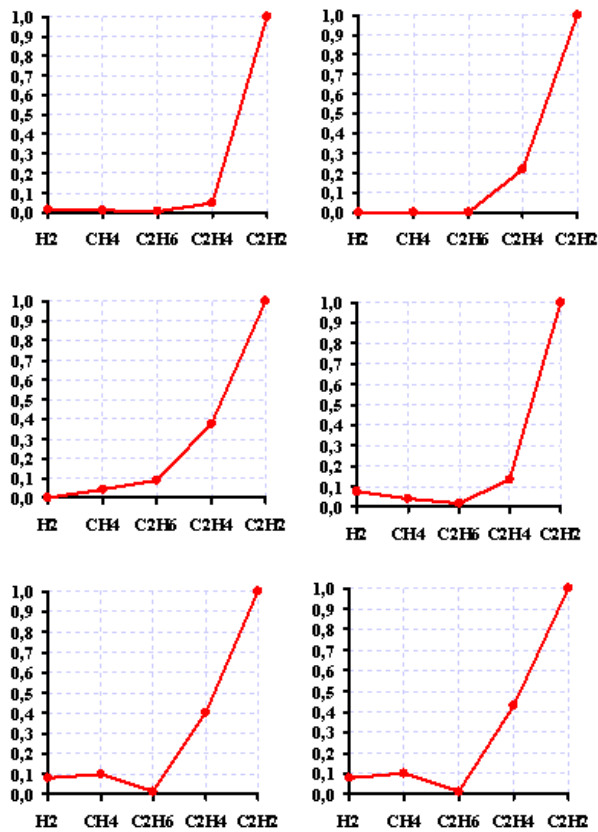


Рис. 9 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов в которых были выявлены разряды большой энергии с максимальным содержанием ацетилена

На рис. 11 приведены графические образы, в которых газом с максимальной концентрацией является ацетилен, но при этом, в пробах масел имеет место достаточно высокое содержание метана. При этом содержание метана превышает содержание водорода, что свидетельствует о том, что в данных трансформаторах электрические разряды сопровождаются перегревами. По результатам разборки таких трансформаторов были выявлены такие дефекты как: касание между верхней консолью и направляющей бака со следами оплавления металла; замыкание между средней рамой магнитопровода и рамой со стороны расширителя; подгорание верхней консоли в месте касания направляющего уголка бака из-за местных разрядов; касание между верхней консолью и направляющей бака со следами оплавления металла, замыкание между средней рамой магнитопровода и рамой со стороны расширителя. В работах [14, 16, 18] такие дефекты идентифицированы как дуговые разряды или дуга в масле.

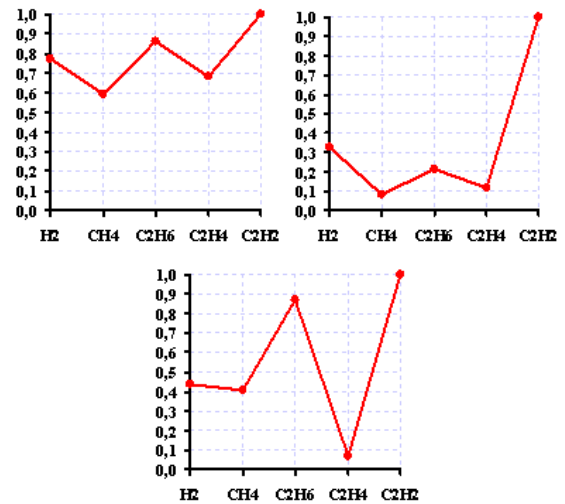


Рис. 10 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов в которых были выявлены разряды большой энергии с максимальным содержанием ацетилена

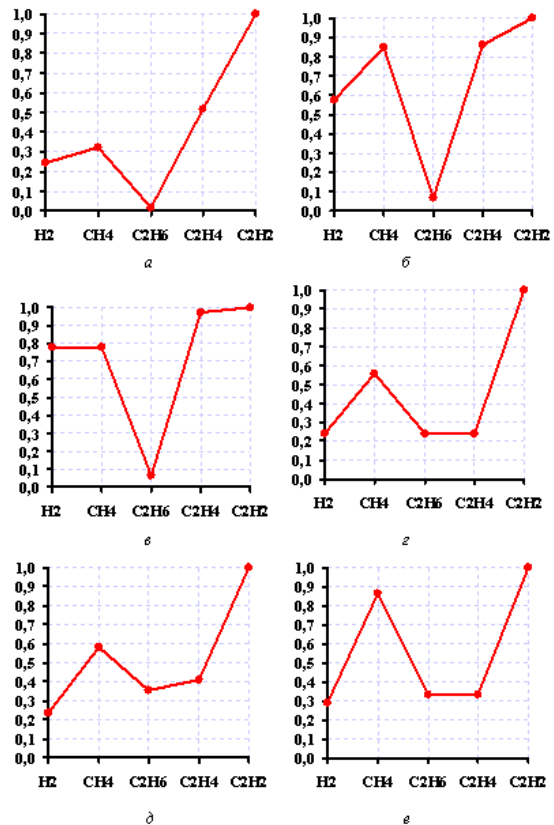


Рис. 11 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов в которых были выявлены разряды большой энергии и перегревы

Характерной особенностью газосодержания масел силовых трансформаторов, по результатам ХАРГ которых построены образы, приведенные на рис. 11 (а-в) является: содержание водорода в пределах 3-25%, метана 10-30%, этана до 5%, этилена до 35%, ацетилена 25 -51%. Графические образы, приведенные на рис. 11 (г-е), построены по результатам ХАРГ трансформаторов с аналогичными дефектами. Однако, отличительной особенностью газосодержания таких трансформаторов, является

более высокое содержание этана, и более низкое содержание этилена, по сравнению с предыдущими образцами, более того для некоторых трансформаторов содержание этана и этилена совпадает. Содержание водорода в таком оборудовании находится в пределах 5-25%, метана 20-40%, этана до 15%, этилена 5-16%, а ацетилен от 30-45%.

На рис. 12 приведены наиболее характерные образцы, полученные по результатам ХАРГ для силовых трансформаторов у которых были выявлены дуговые разряды, а газом с максимальной концентрацией являлся ацетилен. Отличительной особенностью газосодержания трансформаторов с таким дефектом является: содержание водорода в пределах 9-45%, метана 2-22%, этана до 15%, этилена 4-40%, ацетилен 30-76%.

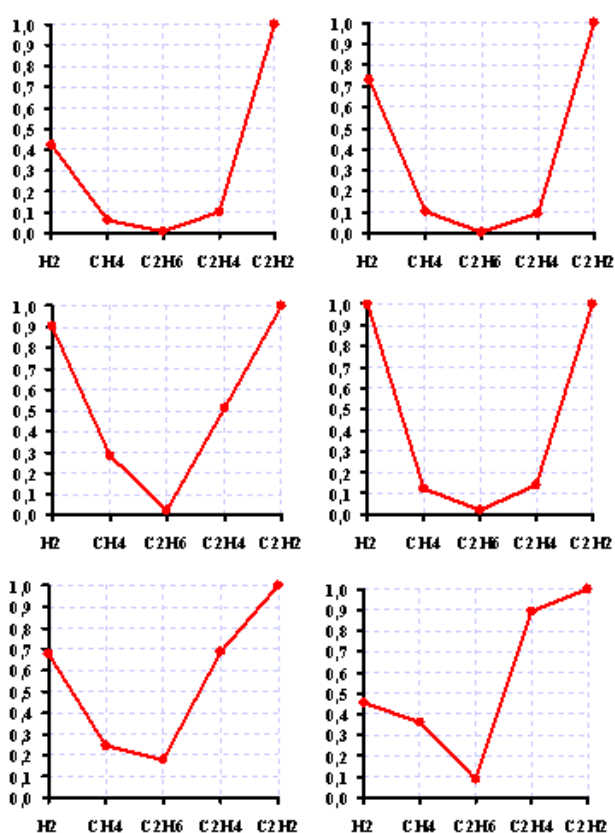


Рис. 12 – Графические образцы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов в которых были выявлены дуговые разряды

Выявленные отличия между графическими образцами для дефектов одного и того же типа, обусловлены различиями газосодержания проб масел, которые в свою очередь вызваны влиянием огромного числа факторов, начиная от конструктивных особенностей оборудования и заканчивая количеством энергии выделяемой при развитии конкретного дефекта.

**Графические образцы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов, у которых выявлены перегревы в диапазоне низких температур.** Сравнитель-

ный анализ графических образов, которые регламентированы разными методиками для распознавания перегревов в диапазоне низких температур (150-300°C), выявлено, что и в [6] и в [7], предложены образцы, в которых газом с максимальной концентрацией является метан (см. рис. 13). Однако если в Украинском нормативном документе [6] образцы, приведенные на рис. 13, соответствуют нагреву в диапазоне низких температур то в Российском документе [7] нагреву в диапазоне средних температур. Однако и визуальный анализ данных образов (превышение концентраций этилена над этаном) и анализ протоколов осмотра оборудования с такими образцами, показали, что это эти образцы соответствуют перегреву в диапазоне средних температур.

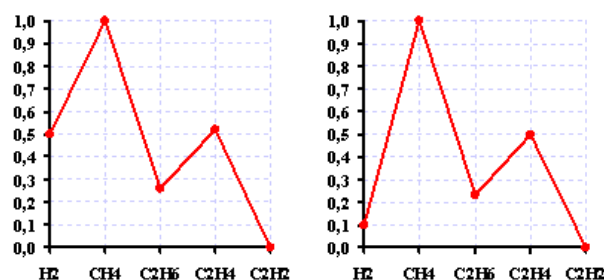


Рис. 13 –Эталонные графические образцы, рекомендуемые для распознавания термических дефектов в диапазоне низких и средних температур

На рис. 14 приведены образцы, построенные по результатам ХАРГ оборудования с перегревами в диапазоне низких температур, для которого газом с максимальной концентрацией являлся метан [13, 18, 21, 25, 28, 31, 35, 39 и др.].

Образам, приведенным на рис. 14 (а-в) соответствуют такие дефекты как: ослабление прессовки магнитопровода, ослабление контактов на шпильках заземления, нагрев прессующих болтов потоками рассеивания и другие. Отличительной особенностью таких дефектов является содержание водорода от 0 до 30%, высокое содержание метана от 50 до 85%, этана от 3 до 40%, этилена до 10%, ацетилен как, правило, отсутствует, или имеет незначительное содержание до 1,5%.

На рис. 14 (г-е) приведена еще одна группа наиболее характерных графических образов, построенных по результатам ХАРГ оборудования с низкотемпературными перегревами. В основном данные дефекты вызваны закупориванием воздухоосушительных фильтров [31], перегревами изоляции крайних катушек и другие. Для таких дефектов характерно примерно такое же содержание водорода до 25%, но более низкое содержание метана от 35 до 55% и более высокие содержания этана 20-45% и этилена до 25%, ацетилен как, правило, отсутствует.

Помимо графических образов, для которых газом с максимальной концентрацией является метан, для дефектов в диапазоне низких температур получено три группы образов, для которых газом с максимальной концентрацией является этан. Следует

отметить, что графических образов дефектов, для которых газом с максимальной концентрацией является этан, нет ни в одной из методик по интерпретации результатов ХАРГ.

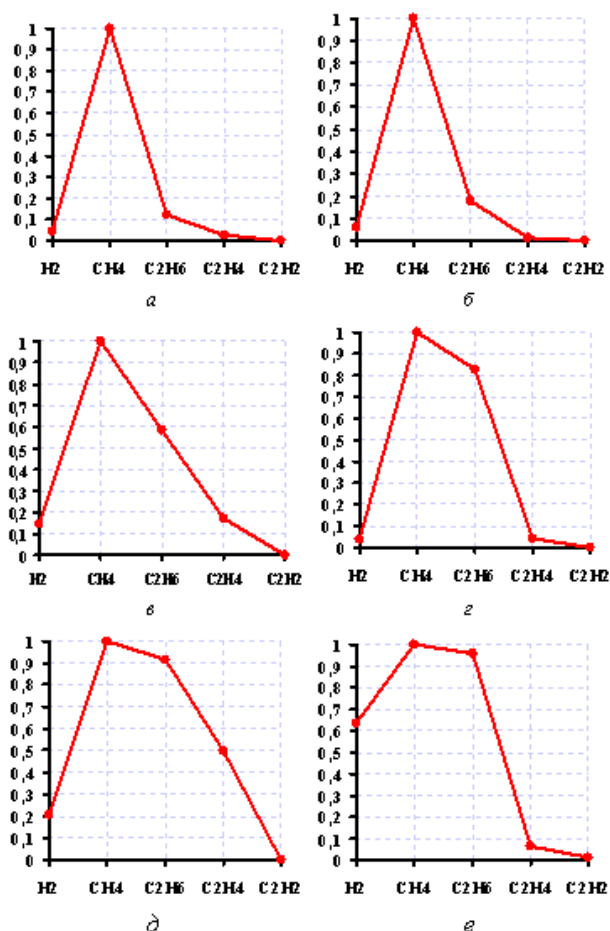


Рис. 14 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ высоковольтного оборудования в котором были выявлены низкотемпературные перегревы (газ с максимальной концентрацией метан)

Однако в открытых литературных источниках [18, 21, 31, 36, 42, 43 и др.], приведено достаточное число такого рода дефектов, что позволило получить наиболее характерные образы для дефектов данного типа.

На рис. 15 (а-е), приведенные образы, соответствуют таким дефектам как: закупоривание воздухоосушительных фильтров, наличие короткозамкнутого контура, повышенные нагревы болтовых соединений и другие. Для таких дефектов характерно содержание водорода до 25%, метана от 20 до 46%, этана от 35 до 67%, этилена до 25%, ацетилен, как правило, отсутствует, или имеет крайне незначительное содержание до 1,5%.

Еще одна группа графических образов, для дефектов в диапазоне низких температур в которых газом с максимальной концентрацией является этан, приведена на рис. 15 (z-e). Эти образы, построены по результатам ХАРГ трансформаторов, по результатам обследования которых, были выявлены в основном такие дефекты как: загрязнение труб и

межтрубного пространства, засоренность труб охладителя, наличие короткозамкнутого контура и другие. Основными особенностями газосодержания оборудования для такого типа дефектов являются подавляющее содержание этана от 55 до 99%, примерно равное содержание метана и этилена до 30%, незначительное содержание водорода до 17%, и практическое отсутствие ацетилена до 1,5%.

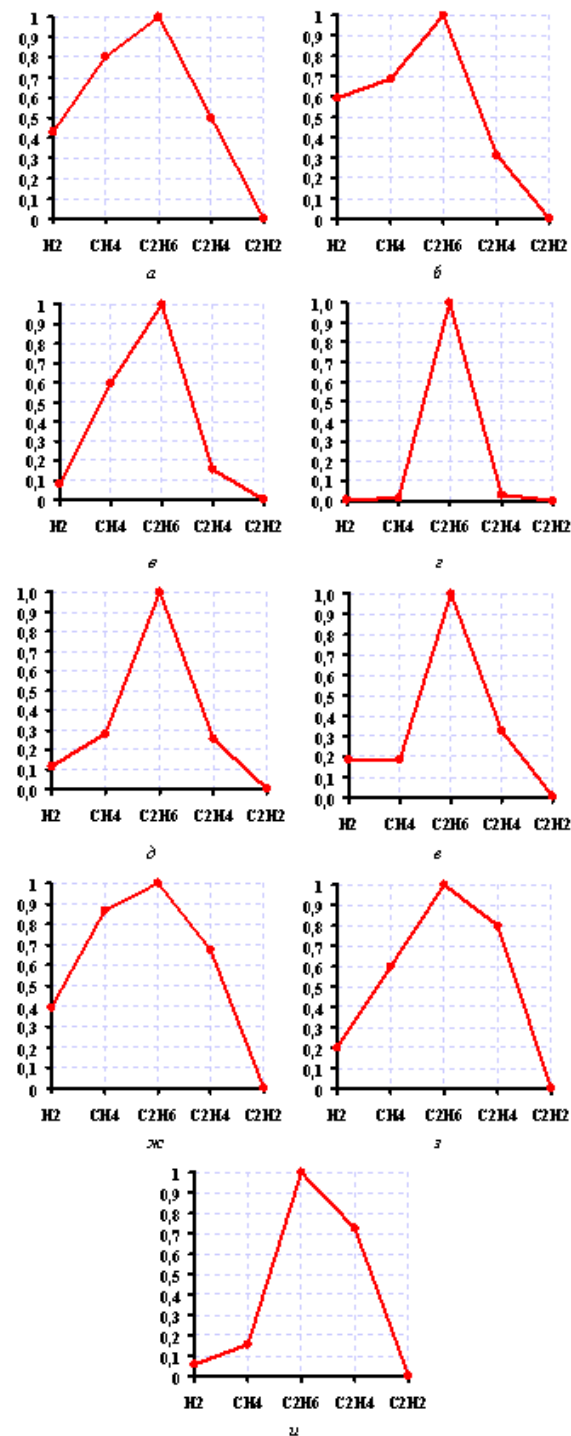


Рис. 15 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ высоковольтного оборудования в котором были выявлены низкотемпературные перегревы (газ с максимальной концентрацией этан)

В графических образах, приведенных на рис.

15 (ж-и) наблюдается нарушение симметрии характерной для образцов, приведенных на рис. 15 (з-е). Данное нарушение происходит за счет увеличения содержания этилена, по сравнению с содержанием метана, в пробах масел. Содержание водорода не превышает 15%, метана от 5 до 30%, этана от 30 до 55%, этилена от 20 до 45%, ацетилен, как правило, присутствует в незначительных количествах менее 1%.

**Графические образы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов у которых выявлены перегревы в диапазоне температур 300-700°C.** Как уже указывалось выше для распознавания дефекта данного типа в [6, 7] регламентированы два графических образа, приведенные на рис. 13. Выполненный анализ показал, что в зависимости от температуры дефекта, газосодержание масел а, следовательно, и графические образы могут отличаться. В зависимости от температуры, для таких дефектов газами с максимальной концентрацией могут являться как метан, так и этилен. На рис. 16 приведены наиболее характерные образы, построенные по результатам ХАРГ для оборудования в котором выявлены термические дефекты в диапазоне температур от 300 до 700°C, а газом с максимальной концентрацией является метан.

К таким дефектам относятся: подгорание контактов избирателя, повышенные нагревы болтовых соединений, наличие короткозамкнутого контура, повреждение обмотки статора насоса, ослабление обмотки НН и ее вывода со шпилькой ввода, перегревы магнитопровода [17, 18, 30 и др.].

В пробах масла оборудования, по результатам ХАРГ, которого построены образы на рис. 16 (а-в), содержание водорода не превышает 15%, метана 45-55%, этана 15-25%, этилена 15-30%, содержание ацетилена не превышает 1%.

Графические образы, приведенные на рис. 16 (з-е) характеризуются более высоким содержанием водорода и этилена. В пробах масла содержится 10-35% водорода, 27-55% метана, 2-28% этана содержание этилена находится в пределах 10-36%, а ацетилена менее 3%. Примечательно, что подобное газосодержание выявлено, как в трансформаторах негерметичного исполнения, так и в трансформаторах с пленочной защитой.

Для образцов, приведенных на рис. 16 (ж-и) характерно более низкое содержание водорода до 15%, повышенное содержание метана 35-85%. Содержание этана не превышает 25%, этилена 5-45%, а ацетилена до 4%;

На рис. 17, приведены графические образы, построенные по результатам ХАРГ оборудования в котором выявлены термические дефекты, в диапазоне температур 300-700°C, но при этом газом с максимальной концентрацией являлся этилен. Результаты ХАРГ, по которым были построены данные образы, приведены в работах [18, 21, 44-46 и др.]. Основным отличием образцов приведенных на рис. 17 (а-в) является то, что газом с максимальной концентрацией является этилен, а вторым газом по

значению концентраций является этан. В пробах масла, трансформаторов с такими дефектами содержание водорода не превышает 20%, метана 25%, этана от 15 до 45%, этилена 35-56%, ацетилена менее 1,5%.

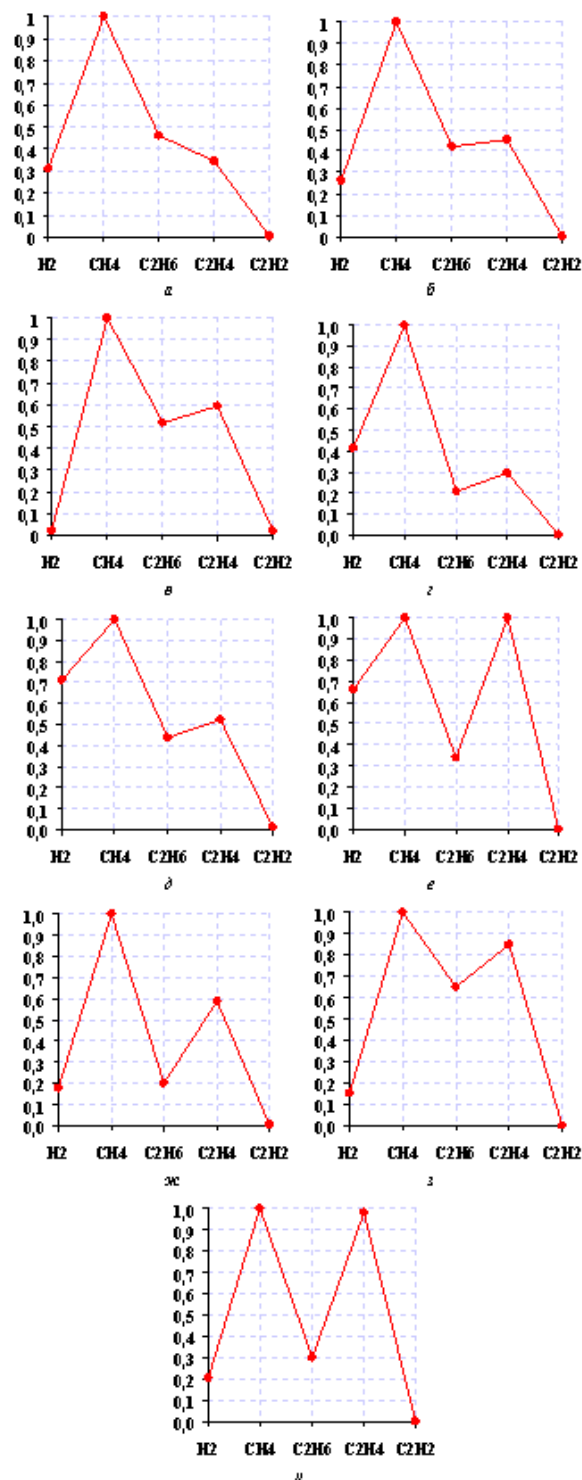


Рис. 16 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ высоковольтного оборудования в котором были выявлены термические дефекты в диапазоне температур 300-700°C, (газ с максимальной концентрацией метан)

В пробах масла, по которым построены образы на рис. 17 (з-е), содержание водорода не превышает

10%, метана 10-30%, этана 15-35%, этилена 40-65%, содержание ацетилену менее 1%.

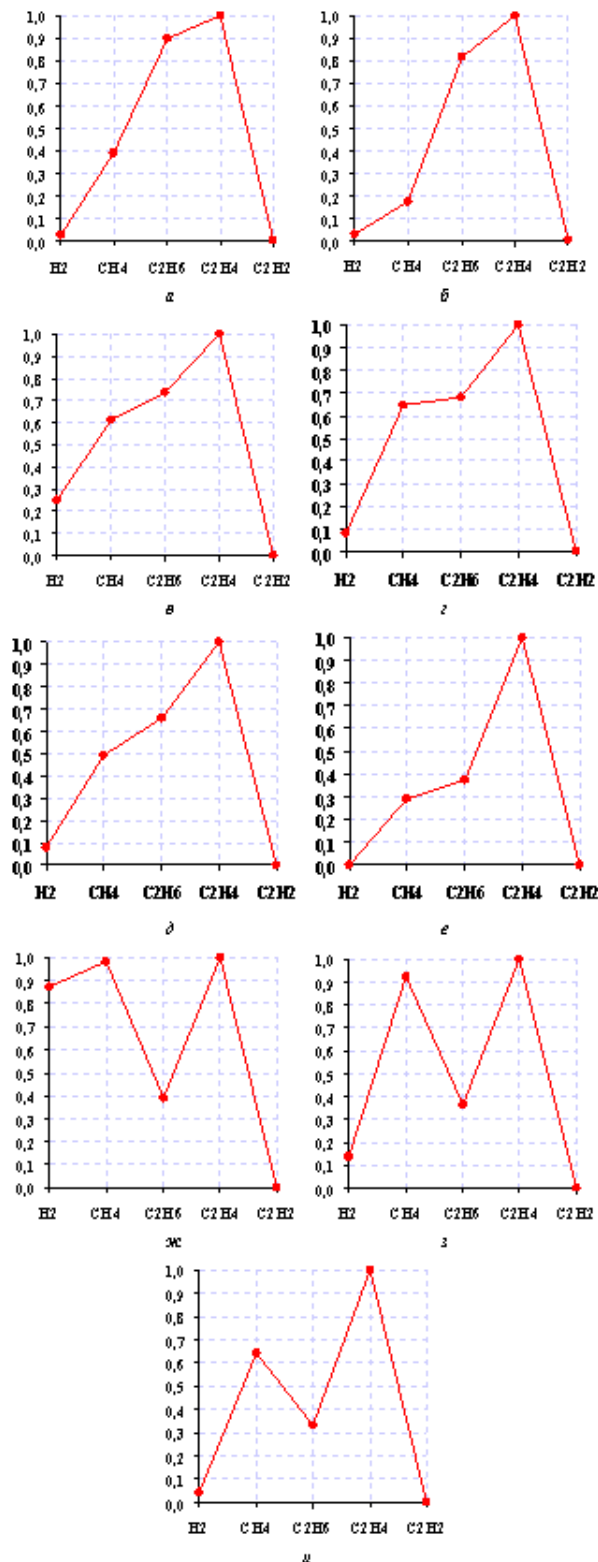


Рис. 17 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ высоковольтного оборудования в котором были выявлены термические дефекты в диапазоне температур 300-700°C.

Газосодержания масел, оборудования по которым построены образы на рис. 17 (ж-и), характери-

зуется содержанием водорода до 30%, метана 20-40%, этана от 5-30%, этилена 25-55%, ацетилен, как правило, отсутствует.

**Графические образы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов у которых выявлены перегревы в диапазоне температур выше 700°C.** Выполненный результатов ХАРГ оборудования с перегревами, температура которых превышает 700°C, показал, что для таких дефектов газом с максимальной концентрацией является этилен, что впрочем, известно. Однако содержание этилена в пробах масел с данным дефектом существенно отличается. На рис. 18 приведены, наиболее характерные графические образы, построенные по результатам ХАРГ, трансформаторов с высокотемпературным перегревом.

Основными дефектами, трансформаторов по результатам ХАРГ, для которых построены образы на рис. 18 (а и б) являются: нарушение контактных соединений, ослабление крепления магнитопровода, касания магнитопровода обмотки, локализованный перегрев масла и другие. При развитии таких дефектов концентрации водорода находятся в пределах 10-28%, метана 20-40%, этана 3-10%, этилена 35-50%, ацетилену до 5%.

На рис. 18 (в и г) приведены графические образы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов в которых выявлены такие дефекты как: повреждение обмотки статора насоса, ослабление вывода обмоток со шпилькой ввода, обгорание шайбы, обугливание изоляционной трубки. В данных трансформаторах содержание водорода не превышает 10%, метана от 25 до 45%, этана от 2 до 15%, этилена от 40 до 60%, ацетилену до 5%.

Большинство дефектов, которым соответствуют образы, приведенные на рис. 18 (д и е), связаны с высокотемпературными перегревами магнитопровода, ослаблениями гайки на шпильках обмоток и т.д. При развитии такого рода дефектов содержание водорода находится в пределах 10-20%, метана 20-35%, этана 2-15%, этилена 40-60%, ацетилену менее 3%.

Графические образы, приведенные на рис. 18 (ж, з) построены по результатам ХАРГ трансформаторов, в которых выявлены нарушения контактных соединений, замыкания прессыющего кольца обмотки, "потеря" изоляции четырех стяжных шпилек магнитопровода, дефекты ПБВ, образование короткозамкнутых контуров, дефекты магнитопровода. В данных трансформаторах содержание водорода не превышает 15%, содержание метана находится в пределах 20-40%, этана до 12%, этилена 50-60%, ацетилену до 4%.

Образы, на рис. 18 (и, к) построены по результатам ХАРГ, для трансформаторов в которых выявлены следующие дефекты: перегрев железа из-за нарушения циркуляции токов в сердечнике, ухудшение состояния контактных соединений, дефекты магнитопровода, дефекты РПН и ПБВ. Содержание водорода для данного оборудования не превышает

12%, метана от 18 до 30%, этана от 3 до 20%, этилена от 55 до 67% ацетилену до 4%.

Дефекты, образы которых приведены на рис. 18 (л, м) в основном вызваны выгоранием и перегревом магнитопровода. Для такого рода дефектов характерно содержание водорода в пределах 5-15%, метана 15-25%, этана 5-15%, этилена 55-65%, и ацетилену до 5%.

Наиболее часто встречающимися, при высоко-температурных перегревах, являются образы, приведенные на рис. 18 (н, о). Данные образы, построены по результатам ХАРГ, для трансформаторов в которых выявлены такие дефекты как: выгорание токоведущего стержня и гибкого токопровода обмотки НН из-за ослабления контакта, перегрев вызванный замыканием на бак магнитопровода, замыкание 4-х шпилек на магнитопровод, перегрев меди из-за вихревых токов, нарушение контактов, появление циркулирующих токов в сердечнике или баке. Кроме того, причинами перегревов могут быть: обгорание заземлений магнитопровода, замыкание транспортных болтов на магнитопровод, нагрев током рассеивания из-за касания верхней консоли магнитопровода с баком. В этих трансформаторах содержание водорода не превышает 15%, метана от 10 до 25%, этана от 2 до 17%, этилена от 53 до 78%, а ацетилену до 10%.

На рис. 18 (п, р) приведены образы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов в которых были выявлены такие дефекты как: горячая точка в сердечнике, перегрев меди из-за вихревых токов, плохие контакты, циркулирующие токи в сердечнике или баке, подгорание контактов переключателей, дефекты магнитопровода, дефекты ПБВ и РПН, изломы ввода обмоток и другие. Со-

держание газов в пробах масел из таких трансформаторов составило: водорода менее 10%, метана 5-20%, этана 3-13%, этилена 65-85%, содержание ацетилену не превышало 10%.

Образы, приведенные на рис. 18 (с, т), также построены по результатам ХАРГ трансформаторов с горячей точкой в сердечнике и длительными перегревами контактных соединений. Особенностью газосодержания масел из этих трансформаторов, является более высокое содержание ацетилену до 15%, примерно равные содержания метана (5-15%) и этана (5-18%), незначительное содержание водорода до 7%, и более низкое содержание этилена от 60 до 80%.

**Графические образы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов у которых выявлены термические дефекты, а газом с максимальной концентрацией является водород.** Кроме приведенных выше образов, соответствующих термическим дефектам, для которых газами с максимальной концентрацией являются метан, этан и этилен, в некоторых зарубежных источниках [13, 16, 17] приводятся результаты ХАРГ, для которых газом с максимальной концентрацией является водород, но при этом в оборудовании были диагностированы дефекты термического характера. Наиболее характерные образы, построенные по результатам ХАРГ данного оборудования, приведены на рис. 19.

Для оборудования, с образцами, приведенными на рис.19 (а-в) в работах [13, 17] поставлен диагноз термический дефект в диапазоне низких температур.

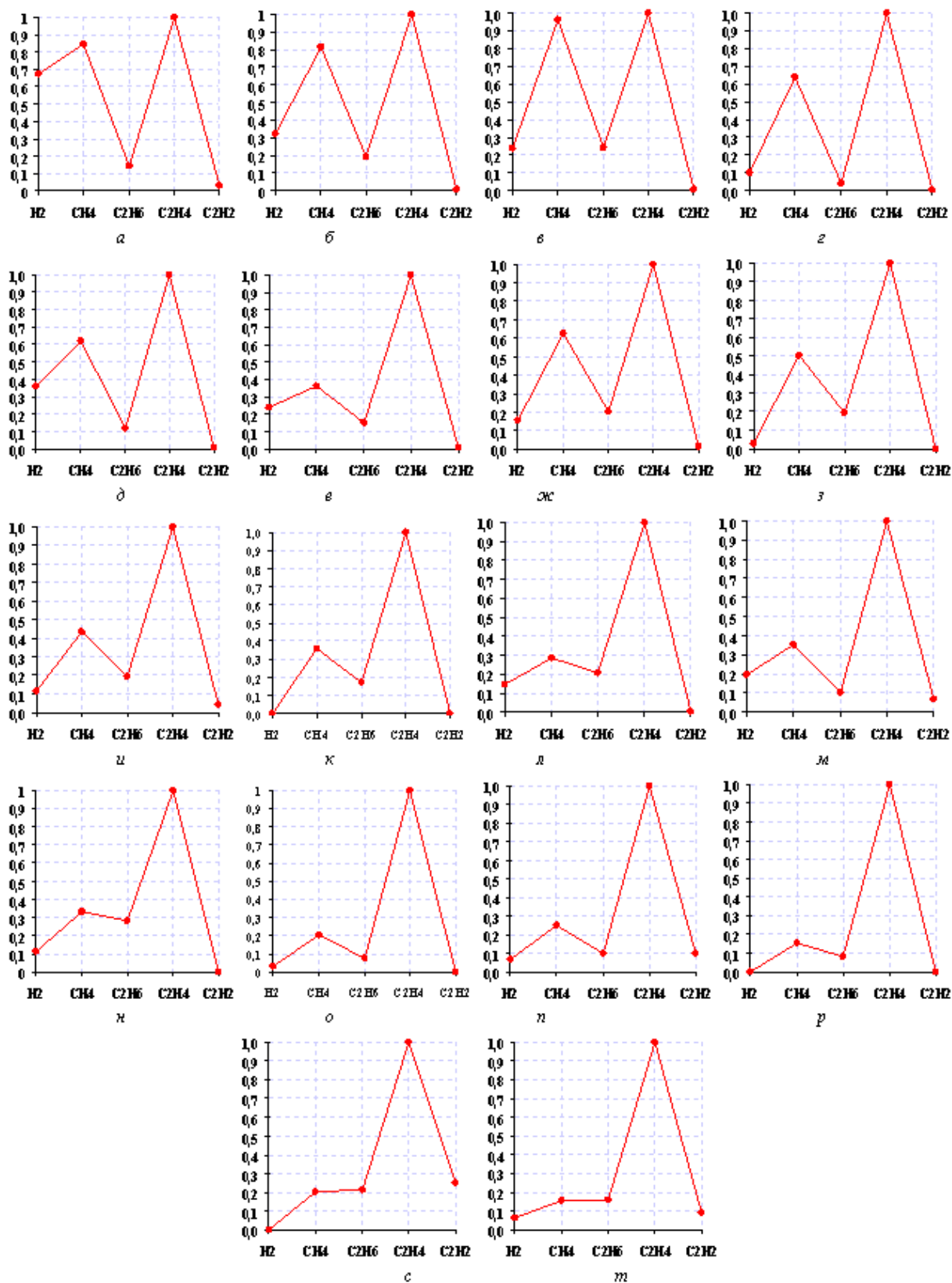


Рис. 18 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ высоковольтного оборудования в котором были выявлены термические дефекты с температурой выше 700°C



Для такого оборудованіе характерно содержание водорода 30-55%, метана 30-45%, этана 5-30%, этилена не более 20%, ацетилену до 2,5%.

Для оборудованія, по результатам ХАРГ которого, построен образ с рис. 19 (з), в работе [47] был поставлен диагноз термический перегрев в диапазоне температур 300-700°C.

В той же работе для оборудованія с газосодержанием соответствующим образу с рис. 19 (д), был поставлен диагноз перегрев с температурой выше 700°C.

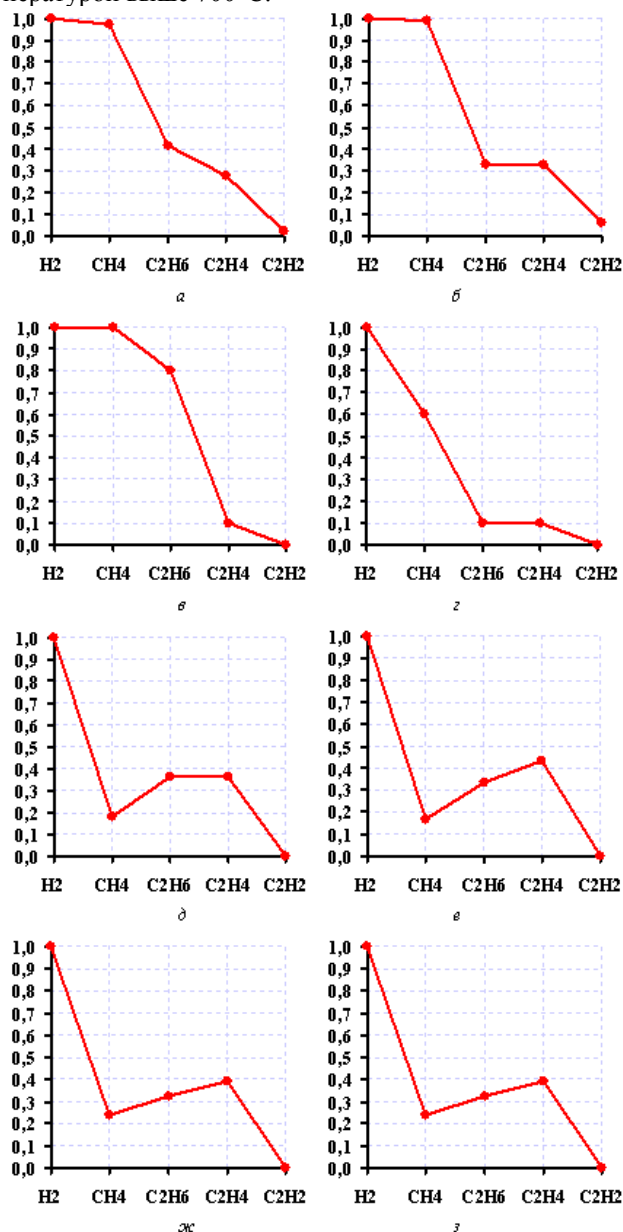


Рис. 19 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ силовых трансформаторов в которых были выявлены термические дефекты, а газом с максимальной концентрацией является водород

Для оборудованія с результатами ХАРГ, по которым построен графический образ, приведенный на рис. 19 (е), в работе [48] был поставлен диагноз термический дефект с температурой ниже 150°C.

Согласно данным [13, 43], в оборудовании по

результатам ХАРГ, которого построены образы с рис. 19 (ж, з) были выявлены дефекты термического характера с температурой 300-700°C. Аналогичные образы были получены и по результатам ХАРГ, приведенным в [49].

Таким образом, несмотря на очевидную схожесть образов (особенно с рис 19 е-з), поставленные разными авторами диагнозы существенно разнятся. Следует также отметить, что для всех без исключения результатов ХАРГ, по которым были построены образы с рис. 19 (з-з), отношение этилена к этану находилось в диапазоне значений от 1 до 1,9, что согласно [6, 7] соответствует дефекту термического характера с температурой 300-700°C. Однако, учитывая выявленные различия в определении характера дефекта, которые приведены в разных источниках, данный вопрос подлежит дополнительному уточнению.

Помимо сходных значений отношений пар газов, для результатов ХАРГ, по которым построены образы, приведенные на рис. 19 (з-з), характерно и близкое содержание газов. Так содержание водорода составило 45-60%, метана 5-35%, этана 5-20%, этилена 5-25%, ацетилену менее 1%.

**Графические образы, построенные по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов в которых выявлены комбинированные дефекты.** Одним из преимуществ распознавания типа дефекта с помощью графических образов, по сравнению с распознаванием по отношениям пар газов [8], является возможность распознавания комбинированных дефектов.

На рис. 20 приведены наиболее характерные образы для низкотемпературных перегревов, которые сопровождаются частичными разрядами. В основном эти образы построены по результатам ХАРГ приведенным в зарубежных источниках [13, 16, 17, 43, 47].

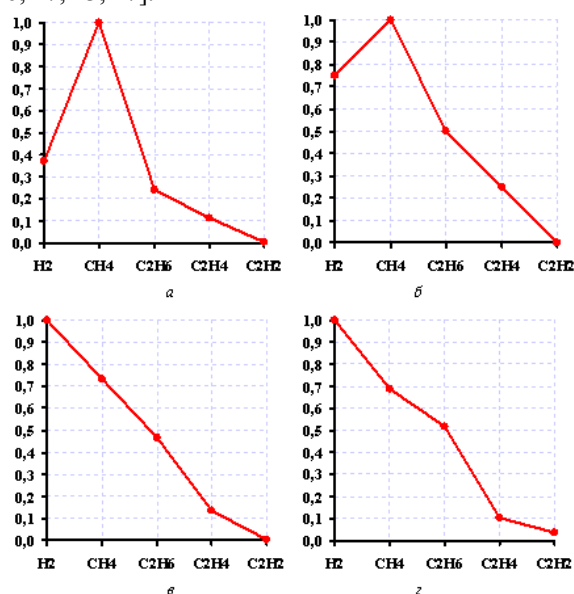


Рис. 20 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ силовых трансформаторов в которых были выявлены низкотемпературные перегревы, переходящие в частичные разряды

Для результатов ХАРГ, по которым построены образы, приведенные на рис. 20 (а, б) характерно, содержание водорода 15-50%, метана 35-65%, этана до 32%, этилена до 15%, ацетилен, как правило, отсутствует. Данные образы характерны для неустойчивых и устойчивых частичных разрядов, которые сопровождаются незначительными перегревами.

Графические образы на рис. 20 (в-г) соответствуют разрядам с перегревами. В отличие от образов, приведенных на рис. 20 (а-б), данные образы, строго не регламентированы в нормативных документах по интерпретации результатов ХАРГ. Однако, в [6] схожий графический образ приведен в приложении, как образ для частичных разрядов, которые сопровождаются перегревами. В пробах масел из оборудования с таким типом дефекта содержание водорода находится в пределах от 40 до 65%, метана от 25 до 35%, этана от 8 до 25%, этилена до 6%, ацетилен не более 1,5%.

На рис. 21 приведены графические образы, построенные по результатам ХАРГ, для оборудования в которых выявлены перегревы, сопровождающиеся разрядами.

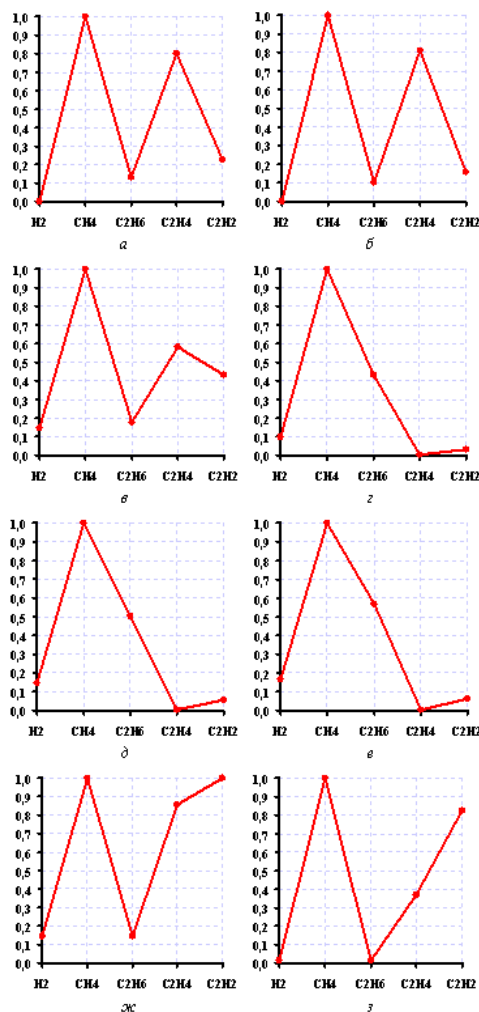


Рис. 21 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ силовых трансформаторов в которых были выявлены перегревы, переходящие в разряды

Так по результатам вскрытия трансформатора ОДЦТР 9000/220 (рис. 21 а) выявлено обугливание изоляции отвода СН в месте выхода из обмотки на длине 1200 мм, а также выгорание активной стали нижнего яра магнитопровода. В автотрансформаторе АТДЦТН-125000/330 (рис 21 б) обнаружена деформация обмотки с замыканием части одного витка. В блочном трансформаторе 320 МВА 220/15,75 (рис 21 в) обнаружен устойчивый развитый частичный разряд (амплитудой до 70 тыс. пКл), с перекрытием по поверхности твердой изоляции. Для данных дефектов характерно, содержание водорода до 30%, метана от 25 до 65%, этана до 15%, этилена от 10 до 40% и ацетилен до 20%.

Графические образы, приведенные на рис. 21 (г-е) построены по результатам ХАРГ устройств РПН [18], в которых были выявлены искрения, обгорание и обуглероживание контактов. Для дефектов данного типа характерно следующее газосодержание: водорода 5-10%, метана 55-65%, этана 25-35%, этилена менее 0,2%, а ацетилен до 5%.

Графические образы на рис. 21 (ж-з), построены по результатам ХАРГ трансформаторов, у которых были выявлены перегревы сопровождающиеся разрядами большой энергии. Для таких трансформаторов характерно невысокое содержание водорода и этана до 5%, метана от 30 до 45%, этилена от 15 до 30% и ацетилен от 30 до 40%.

Выполненный анализ, результатов ХАРГ, которые приведены в открытых литературных источниках позволили выделить группу графических образов, которые соответствуют электрическим разрядам с перегревами, при этом газом с максимальной концентрацией является этан. Следует отметить, что ни в одном из нормативных документов, такие образы не приведены. В тоже время, такие дефекты достаточно часто встречаются в литературных данных [13, 16, 25, 27, 28, 35, 41, 50 и др.] и, как правило, имеют достаточно серьезные последствия.

Данные образы приведены на рис. 22. Графический образ, приведенный на рис. 22 (а), построен по результатам ХАРГ, блочного трансформатора 250 кВ, гидроэлектростанции "Nelson river", Северная Канада [35], 1977 года изготовления. Данный трансформатор работал на полную мощность. В мае 1998 года в трансформаторе обнаружено повреждение изоляции, витковое замыкание, наличие поверхностных разрядов на барьерах и на обмотке ВН.

Образ на рис. 22 (б) также построен по результатам ХАРГ, блочного трансформатора 125 кВ, гидроэлектростанции "Nelson river", Северная Канада [35], за 5 дней до пробоя. Образ, построенный по результатам ХАРГ этого же трансформатора, но после повреждения приведен на рис. 7 а.

Причиной повреждения в 1994 году, трансформатора напряжением 250 кВ, гидроэлектростанции "Nelson river", Северная Канада [35], изготовленно-

го в 1977 г, стал тепловой пробой. Осмотр обмотки после пробоя показал наличие медных частиц в обмотке, на магнитопроводе, и на соединительном конце на кукле, которые вызвали тепловой пробой. Образ, построенный по результатам ХАРГ этого трансформатора, приведен на рис. 22 (б).

Образ, приведенный на рисунке 22 (з) соответствует искровому разряду, сопровождающемуся нагревом до 300°C. При обследовании ТН, по результатам ХАРГ которого он был построен, было установлено, что омическое сопротивление нулевого вывода обмотки ВН изменилось более чем на 10%. При разборке был обнаружен плохой контакт в нижней части обмотки ВН.

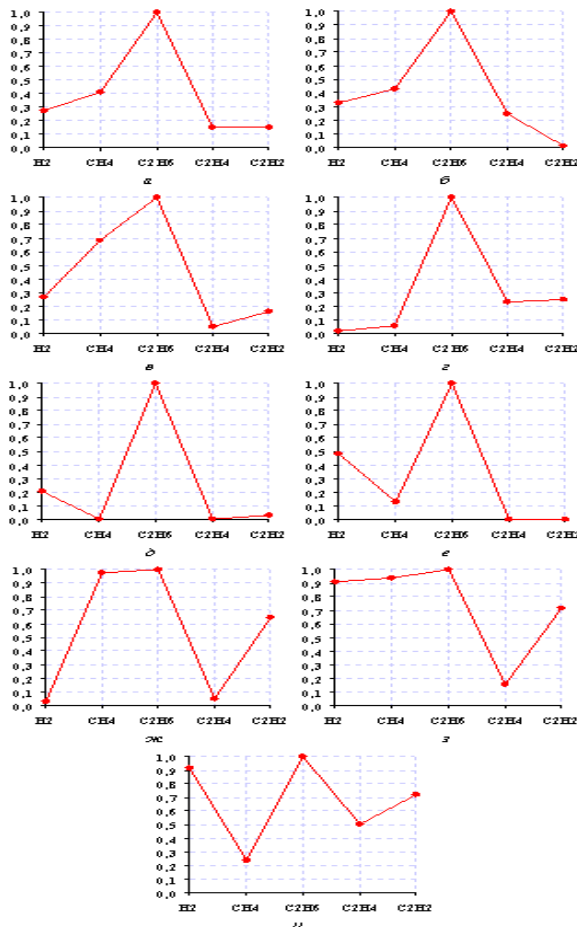


Рис. 22 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ силовых трансформаторов в которых были выявлены перегревы, сопровождающиеся электрическими разрядами

Образ на рис. 22 (д), построен по результатам ХАРГ устройства РПН, в котором выявлены повреждения контактов и образование науглероженных частиц в масле. А образ на рис. 22 (е), построен по результатам ХАРГ трансформатор тока НКФ 110 кВ, в котором обнаружено образование Х-воска. При развитии таких дефектов содержание водорода

может достигать 45%, метана до 35%, этана от 35 до 80%, этилена до 35%, ацетилена до 15%.

Графические образы, приведенные на рис. 22 (ж-и), построены по результатам ХАРГ дефектного оборудования, в пробах масла которого выявлено более высокое содержание ацетилена. Графический образ рис. 22 (ж) построен по результатам ХАРГ, для высоковольтного ввода МПТ- 110/1400 [39], в котором по результатам осмотра был выявлен пробой изоляционного остова. Образ, приведенный на рис. 22 (з), построен по результатам ХАРГ блочного трансформатора 230/127 кВ, гидростанции "Nelson river", Северная Канада [35], изготовленного в 1971 г, и поврежденного в июне 1997г. В данном трансформаторе имело место два повреждения: трекинг между куклой ввода 230 кВ и заземляющим электростатическим экраном, а также дуговые витковые замыкания внутри обмотки ВН с переходом в короткое замыкание на экран. Образ на рис. 22 (и), построен по результатам ХАРГ трансформатора, в котором выявлены разряды высокой интенсивности и перегрев. Для приведенных дефектов характерно следующее содержание газов: водорода до 25%, метана 5-38%, этана 25-40%, этилена до 15%, ацетилена от 15 до 35%.

На рис. 23 приведены наиболее характерные графические образы, построенные по результатам ХАРГ высоковольтного оборудования в котором были выявлены перегревы в диапазоне температур выше 700°C и разряды. Так образы, приведенные на рис. 23 (а, б) построены по результатам ХАРГ [например, 51] трансформаторов с такими дефектами как: витковое замыкание при сквозном коротком замыкании, перегрев токоведущих соединений и элементов конструкции остова и разряды большой мощности и другие. В зависимости от стадии развития дефекта содержание водорода может достигать до 10%, метана до 2%, этана до 5%, этилена от 85 до 99%, ацетилена до 10%.

Образы, приведенные на рис. 23 (в, г) построены по результатам ХАРГ, высоковольтного оборудования, в котором выявлены следующие дефекты: перегрев токоведущих соединений и разряды, замыкание магнитопровода на бак, перегрев контактов предизбирателя со следами разрядов и другие. В таких трансформаторах содержание водорода находится на уровне 3-35%, метана до 20%, этана до 25%, этилена 45-80%, ацетилена до 30%.

На рис. 23 (д, е) приведены графические образы, построенные по результатам ХАРГ трансформаторов с такими дефектами как: ослабление контакта в месте присоединения токопровода к токоведущему стержню обмотки НН, следы нагрева и разрядов на элементах отборника устройства РПН, дефекты магнитопровода и другие. В таких трансформаторах концентрации водорода не превышают 10%, метана 5-20%, этана 15-35%, этилена 40-75%, а ацетилена менее 10%.

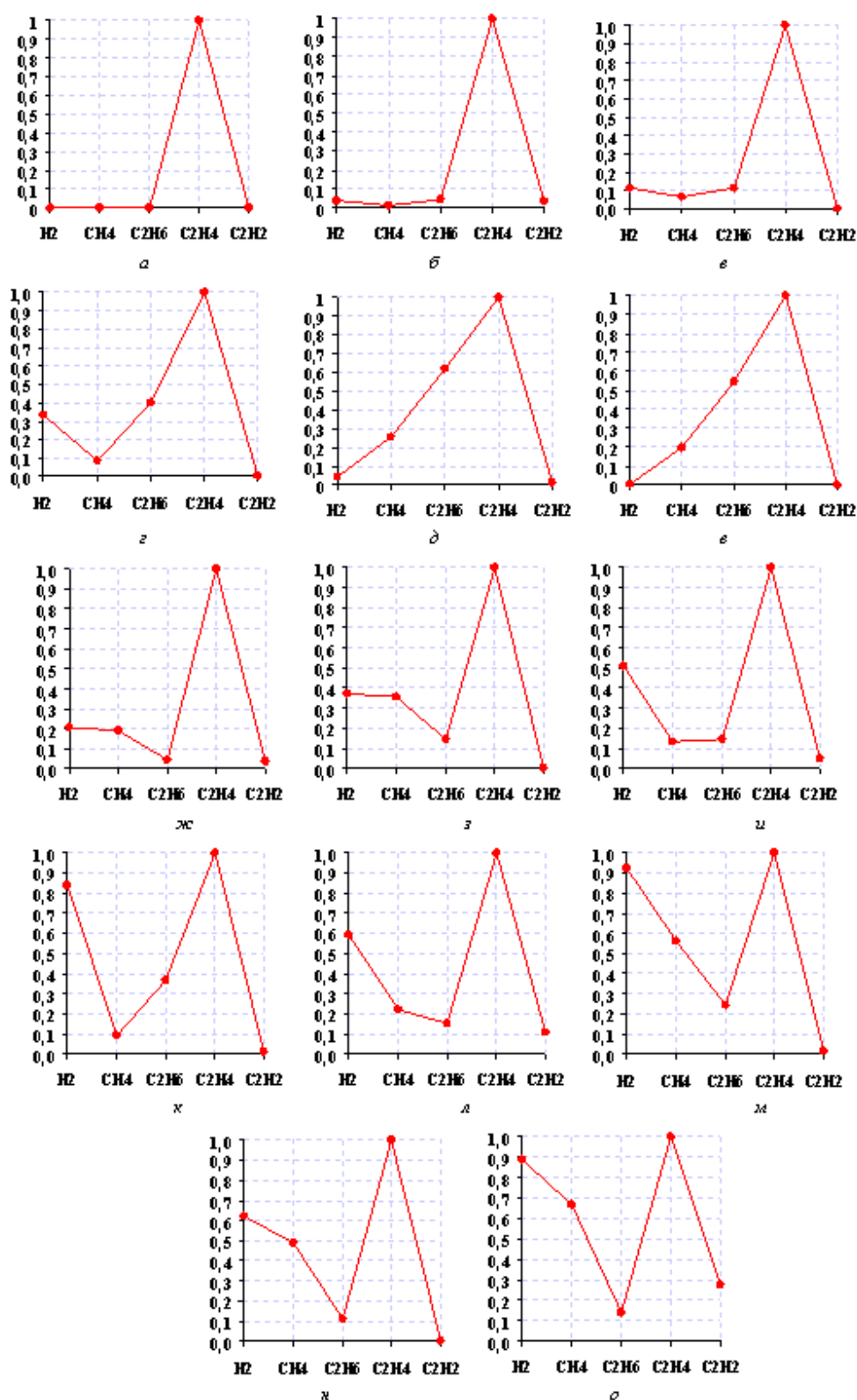


Рис. 23 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ высоковольтного оборудования в котором были выявлены электрические разряды и перегревы выше 700°C.

Графические образы, приведенные на рис. 23 (ж, з), построены по результатам ХАРГ трансформаторов, у которых выявлены следующие дефекты: перегревы вызванные замыканием на бак магнитопровода со следами разрядов, перегревы гетинаксовой прокладки и железа стыкового магнитопровода

со следами разрядов, дефекты магнитопровода и разряды и другие. В пробах масел из этих трансформаторов имеет место более высокое содержание водорода от 10-25%, метана 10-20%, этана до 10%, этилена 70%, ацетилена до 5%.

Содержание газов в пробах масел, по которым построены образы, приведенные на рис. 23 (и, к), характеризуются более высоким содержанием водорода 20-40%, метана до 15%, этана 5-25%, этилена 30-55%, а ацетилен до 10%. Данные образы характерны для искровых разрядов и высокотемпературных перегревов.

Графические образы на рис. 23 (л, м) внешне очень схожи с образами на рисунке 23 (и, к). Однако в пробах масел из оборудования, по результатам ХАРГ которого построены данные образы, содержание метана превышает содержание этана. При этом содержание водорода составляет 20-40%, метана 10-25%, этана не более 20%, этилена 35-50%, ацетилен до 10%.

Образы, приведенные на рис. 23 (н, о) построены по результатам ХАРГ трансформаторов, в которых выявлены высокотемпературные перегревы сопровождающиеся искрением и разрядами. Для таких дефектов характерно содержание водорода 20-35%, метана 20-30%, этана 2-7%, этилена 30-50%, ацетилен до 10%.

Образы, соответствующие перегревам с температурой свыше 700°C, сопровождающихся разрядами высокой энергии приведены на рис. 24.

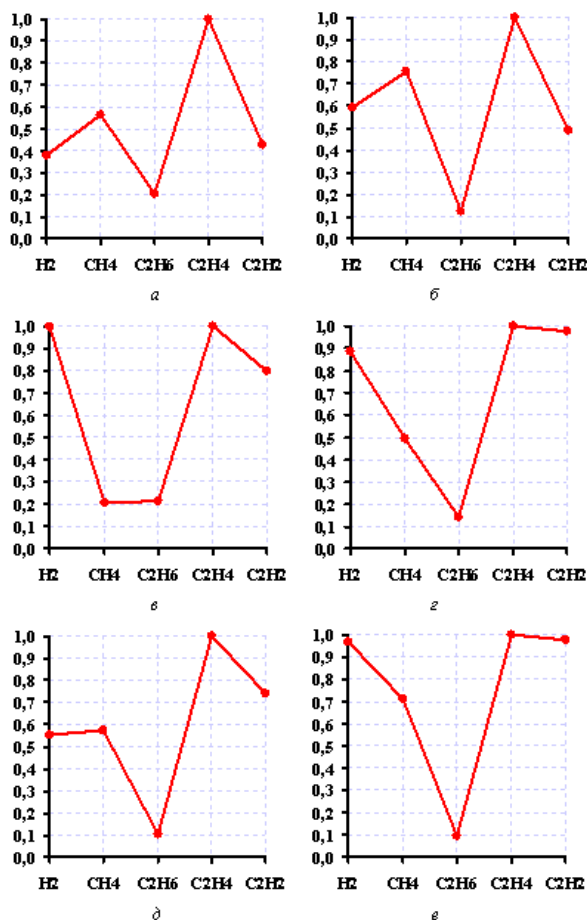


Рис. 24 – Графические образы, построенные по результатам ХАРГ высоковольтного оборудования в котором были выявлены электрические разряды и перегревы выше 700°C.

Для дефектов, соответствующим образам на

рис. 24 (а, б) характерно содержание водорода 10-25%, метана 15-30%, этана не более 10%, этилена 30-50%, ацетилен до 20%. Эти образы, построены по результатам ХАРГ оборудования, в котором выявлены перегревы сопровождающиеся разрядами [6]. Образы на рис. 24 (в, г) получены для силовых трансформаторов, в которых высокотемпературный перегрев сопровождается мощными искровыми и поверхностными разрядами. Например, образ на рис. 24 (д), построен по результатам ХАРГ для автотрансформатора

АОДЦНТН-167000/500/220/15,75. В данном автотрансформаторе были выявлены дуговые разряды в ярмовой балке верхней части трансформатора, а также искрение в устройстве РПН и частичные разряды в районе ввода 500 кВ. Для подобных дефектов характерно содержание водорода 20-35%, метана 5-20%, этана менее 10%, этилена 25-40%, ацетилен 10-30%.

Образы на рис. 24 (д, е) построены по результатам ХАРГ трансформаторов, с такими дефектами как перегревы, сопровождающиеся дуговыми разрядами. Например, «потеря» изоляции шпилек, в результате чего в контуре, состоящем из шпильки, наружных листов магнитопровода и перемычек, соединяющих и заземляющих все листы магнитопровода, возникает разрядный ток. Визуально на стяжной шпильке, были обнаружены следы дуговых разрядов. Также достаточно распространенными дефектами для данных образцов, являются перегревы, вызванные замыканиями на бак магнитопровода со следами разрядов. В высоковольтных вводах, залитых маркой ГК [39], подобные образы были получены при пыли и продуктов разложения масла. Для проб масел с такими дефектами характерно содержание водорода 10-30%, метана 15-30%, этана до 10%, этилена 25-35%, ацетилен до 30%.

Приведенные результаты, показывают, что в условиях реальной эксплуатации, графические образы, соответствующие дефектам разного типа, намного разнообразней, чем эталонные образы, регламентируемые в действующих нормативных документах. Построенные по результатам анализа образы, позволяют значительно расширить базу эталонных образцов, что позволит распознавать большее число дефектов, особенно это касается перегревов в диапазоне низких и средних температур, а также комбинированных дефектов, для которых газом с максимальной концентрацией является этан. Поскольку под влиянием целого ряда эксплуатационных факторов, образы построенные для одного и того же типа дефекта сильно отличаются друг от друга, то для распознавания типа дефекта предлагается использовать не строго фиксированные графические образы, а диапазоны значений координат графических образов, которые получены для дефектов разного типа.

### Выводы

1. Выполненные исследования показали, что количество образцов, построенных по результатам ХАРГ дефектного оборудования, находящегося в

експлуатації, набагато перевищує кількість нормованих образів;

2. Виконаний аналіз графічних образів, побудованих за результатами ХАРГ високовольтного обладнання в якому були виявлені дефекти різного типу, показав, що навіть при одному і тому ж дефекті, графічні образи можуть суттєво відрізнятися;

3. Порівняльний аналіз газосодержання проб масел і графічних образів, побудованих за результатами ХАРГ, обладнання з дефектами різного типу, показав суттєву різницю в газосодержанні масел. Виявлене відхилення в газосодержанні, обумовлено різницею в енергії разрядів або температурою дефекта, конструктивними особливостями обладнання, сортом трансформаторних масел і інших факторів;

4. На основі виконаного аналізу, встановлено, що кожному типу дефекта відповідає строго визначене значення вмісту газів;

5. Для більш надійного розпізнавання передбачено використовувати не строго фіксовані графічні образи, а діапазони значень координат графічних образів, які отримані для дефектів різного типу;

6. Побудовані за результатами аналізу образи, дозволяють значно розширити базу еталонних образів, що дозволить розпізнавати більше число дефектів, особливо це стосується перегревів в діапазоні низьких і середніх температур, а також комбінованих дефектів, для яких газом з максимальної концентрацією є етан;

7. Виконаний аналіз показав, що графічні образи, не враховують різницю в вмісті газу з максимальною концентрацією, для обладнання з різними типами дефектів (вміст водороду в трансформаторах з дефектами електричного типу, вміст етилену в трансформаторах з перегревами в діапазоні температур 300-700°C і вище 700°C і др.);

**Список літератури:** 1. *Шутенко О.В.* Аналіз проблем, що виникають при інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених в маслі газів // *Шутенко О.В., Абрамов В.Б., Баклай Д.Н.* // Вісник НТУ «ХП». Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність.–2013.–№59(1032).–С. 164–180; 2. *Шутенко О.В.* Аналіз законів розподілу відношень пар газів, рекомендує СОУ-Н ЕЕ 46.501 для розпізнавання типу дефекта в високовольтних трансформаторах // *Шутенко О.В., Баклай Д.Н.* // Енергетика та електрифікація.–2013.–№8.–С. 36–47; 3. *Шутенко О.В.* Аналіз законів розподілу відношень пар газів, рекомендує зарубіжними методами для розпізнавання типу дефекта в високовольтних трансформаторах // *Шутенко О.В., Баклай Д.Н.* // Світлотехніка та електроенергетика.–2013.–№3–4–С. 68–80; 4. *Шутенко О.В.* Обґрунтування необхідності корекції значень відношень пар газів при розпізнаванні типу прогнозованого дефекта по результатам аналізу розчинених в маслі газів // *Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Мацєвський А.О.* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХХІV міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II (18-20 травня 2016р., Харків). – Х.: НТУ «ХП». – 343 с. – С. 196; 5. *Шутенко О.В.* Аналіз графічних методів розпізнавання типу дефекту за результатами ХАРГ // *Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Горожанкіна Т.Г.* // Вісник НТУ «ХП». Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність.–2016.–№3(1175).–С. 122–140; 6. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: Діагно-

стика маслорозчиненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі.–Київ.–2007.–92 с; 7. РД 153-34.0-46.302-00: Методичне указання по діагностиці розвиваючихся дефектів трансформаторного обладнання по результатам хроматографічного аналізу газів, розчинених в маслі. – Офіц. изд. М.: НЦ ЭНАС, 2001. – 28 с.; 8. *Шутенко О.В.* Аналіз достовірності розпізнавання типів дефектів трансформаторів при використанні відношень пар газів і графічних образів дефектів // *Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А., Мельник Н.Ю.* // Вісник НТУ «ХП». Сер.: Енергетика: надійність та енергоефективність.– 2013.–№17(990).–С. 178–187; 9. *Снеткова О.В.* Опыт диагностики указаний маслоразделенных вводов 110-500 кВ в ОАО «Мосэнерго» // *О.В. Снеткова* // Электро.– 2004.–№ 2.–С. 39–42; 10. *Комаров В.И.* О влиянии масла марки ГК на надёжность электрооборудования / *В.И. Комаров, А.Н. Лушин, В.Н. Осотов, Д.Н. Просвиринов* // Материалы пленарного заседания совета «Высоковольтные вводы – современное состояние производства, эксплуатации, диагностирования и ремонта», «Общие проблемы диагностики силового электрооборудования». – Истринский район Московской области –2008.–Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/58746/> – Дата звертання: 15 вересня 2016.; 11. *Давиденко И.В.* Аналіз техніко-економічних показателів парку електрообладнання з допомогою ЭДИС «Альбатрос». // *И.В. Давиденко* // Материалы конференции «Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования». – Пермь. –2015. – Режим доступа: <http://dimrus.com/conf2015.html>. – Дата звертання: 13 вересня 2016.; 12. *Мищенко Э.Н.* Хроматографический контроль масла вводов силовых трансформаторов // *Э.Н. Мищенко, Г.В. Шинкаренко* // Электрические станции.–1986.–№ 3–С. 64–67; 13. *Sherif S. M. Ghoneim.* Artificial Neural Networks for Power Transformers Fault Diagnosis Based on IEC Code Using Dissolved Gas Analysis // *Sherif S. M. Ghoneim and Ibrahim B. Tahar* // International journal of control automation and systems.– 2015.–Vol. 4–№ 2–pp. 18–21; 14. *Mostafa. M. Ibrahim.* Artificial Intelligence Solution For Incipient Faults Diagnosis Of Oil-Filled Power Transformers // *Mostafa. M. Ibrahim, M. M. Sayed, and E. E. Abou El-Zahab* // Proceeding of Journal of Electric Engineering.–2015.–Vol. 19.–Edition 4.–pp 1–6; 15. *Ming-Jong Lin* Gaussian distribution Diagnoses in Transformer's Insulating Oil / *Ming-Jong Lin* // Joint International Mechanical, Electronic and Information Technology Conference (JIMET 2015).–Chongqing China. – 18-20.12.2015.–pp 824 – 830; 16. *Mohd Muhridza Bin Yaacob.* DGA Method-Based ANFIS Expert System for Diagnosing Faults and Assessing Quality of Power Transformer Insulation Oil // *Mohd Muhridza Bin Yaacob, Ahmed Raisan Hussein, Mohd Fauzi Bin Othman* // Modern Applied Science.–2016.–Vol. 10.–№ 1–pp. 13–22; 17. *Afiqah R.N.* Fuzzy Logic Application in DGA Methods to Classify Fault Type in Power Transformer // *R. N. Afiqah, I. Musirin, D. Johari, M. M. Othman, T. K. A. Rahman, Z. Othman* // Selected Topics in Power Systems and Remote Sensing. –2009.–pp. 83-88; 18. *Michel Duval* A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers // *Michel Duval* // IEEE Electrical Insulation Magazine.–2002.–Vol. 18.–№3.–pp. 8–17; 19. *Долин А.П.* Актуальность локация электрических разрядов в измерительных трансформаторах // *Долин А.П., Поночко Ч., Попович А.* // Электро.–2005.– № 2.– С. 27–31; 20. *Ahmed M R.* Power transformer Fault Diagnosis using Fuzzy Logic Technique Based on Dissolved Gas Analysis // *M.R. Ahmed, M.A. Geliel, and A. Khalil* // 21 st Mediterranean Conference on Control&Automation (MED), Platania-Chania, Crete, Greece, June 25-28.–2013.–pp. 584-589; 21. *Ahmed Raisan Hussein.* An expert system for diagnosing faults and assessing the quality insulation oil of power transformer depending on the DGA method // *Ahmed Raisan Hussein, M. M. Yaacob, M.F. Othman* // Journal of Theoretical and Applied Information Technology.–2015.–№2.–Vol. 78.–pp. 278-285; 22. *Inderpreet Kaur* Residual Life assessment with DGA, Furan content in transformer oil and Degree of polymerization of solid insulation // *Inderpreet Kaur, Preetinder Singh* // International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering.– 2016.–Vol. 6.–pp. 230–234; 23. *Рыжжикова А.Ю.* Аналіз і удосконалення хроматографічного методу діагностики маслорозчиненого високовольтного електрообладнання: автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук:05.14.12 «техника высоких напряжений» // *А.Ю. Рыжжикова.* – Новосибирск: 2012.–20 с; 24. *Дарьян Л.А.* Интерпретация результатов хроматографическо-

го анализа газообразных продуктов разложения трансформаторных масел при воздействии ультразвуковой кавитации //Л.А.Дарьян //Электро.-2011.- № 1.-С. 29-35; 25. Hazlee Azil Transformer Incipient Fault Prediction Using Combined Artificial Neural Network and Various Particle Swarm Optimisation Techniques /Hazlee Azil Illias, Xin Rui Chai, Ab Halim Abu Bakar, HazlieMokhlis// PLoS One.-2015.-№ 10(6).- pp. 1-16; 26. Sadeq Y. Jasmin Dissolved gas analysis of power transformers / Sadeq Y. Jasmin and Jyoti Shrivastava// International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER). – 2013.– Vol. 3.– Issue 5.– pp. 1-102; 27. Sherif Ghoneim. Early Stage Transformer Fault Detection Based on Expertise Method /Sherif Ghoneim and Nadjim Merabtin// International Journal of Electrical Electronics and Telecommunication Engineering.– 2013.– Vol. 44.– pp.1289 –1294; 28. Ming-Jong Lin. A New Approach with Three Dimension Figure and ANSI/IEEE C57.104 Standard Rule Diagnoses Transformer's Insulating Oil /Ming-Jong Lin //Engineering.– 2014.–№ 12–Vol.6.– pp. 841–848; 29. Tejeswi Deherwal Study and Diagnosis of Key Gases to Detect the Condition Monitoring Of Oil Immersed Current Transformer /Tejeswi Deherwal, Ranjana Nigam Singh // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT).–2012.– Volume 2.–pp. 118–120; 30. Xiaohui Wang. Research on Transformer Fault Diagnosis based on Multi-source Information Fusion /Xiaohui Wang, Kehe Wu and Yang Xu// International Journal of Control and Automation. – 2014. – № 2 – Vol. 7. –pp.197-208; 31. Боярчуков Г.М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле /Г.М. Боярчуков // Новини енергетики.–2010.–№10.–С. 24–33; 32. Керимкулов Н.Н. Разработка критериев безаварийной эксплуатации маслонаполненного оборудования подстанции. Байсовский подход /Н.Н. Керимкулов, В. М. Левин // Диагностика электрических установок: материалы 10 объединен. науч.-практ. семинара по проблемам эксплуатации, диагностирования, ремонта и продления срока службы трансформаторов.–Новосибирск.–2015.–С. 24–30; 33. Аксенов Ю.П. Использование усовершенствованных методов электромагнитной локализации разрядных явлений для определения объема ремонта трансформаторов /Ю.П. Аксенов, В.И. Завидей, И.В. Ярошенко// Электро.–2004.– № 5.– С. 19–24; 34. Комаров В.И. Анализ причин повреждаемости и специфики диагностики трансформаторов до 35 кВ. /В.И. Комаров, И.В. Давиденко// Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования: сб. докладов «Современное состояние и проблемы диагностирования оборудования электрических сетей напряжением 6-35 кВ». – С-Пб.: ПЭИПК.–2008.–Выпуск 31.–С. 44–48; 35. Аксенов Ю.П. Мониторинг технического состояния высоковольтной изоляции электрооборудования энергетического назначения в эксплуатации и при ремонтах. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – 338 с; 36. L. Bouchaoui Diagnostic des Transformateurs de Puissance par la Méthode d'Analyse des Gaz Dissous: Application des Réseaux de Neurones/ Bouchaoui L // Université Ferhat Abbas Sétif UFAS (ALGERIE). – 2010. – 155 p; 37. Wong K.O. Expert System for the Fault Diagnosis of Oil-Filled Power Transformer Using Dissolved Gas Analysis /K.O. Wong and T.K. Saha //In: International Symposium on High Voltage Engineering. – Indian Institute of Science.–2001.–Vol. 5.–pp. 1–4; 38. Ian A.R. Gray Practical Experience Gained from Dissolved Gas Analysis at an Aluminium Smelter /Ian A.R. Gray// Doble Eskom Annual International Conference, Southern Africa. – 2010; 39. Анализ концентрации газов в масле вводов трансформатора Режим доступа: <http://energetik22.ru/analiz-koncentracii-gazov-v-masle-vvodov-transformatora> Дата звертання: 10 серпня 2016.; 40. Lewand L. Using dissolved gas analysis to detect active faults in oil-insulated electrical equipment /L. Lewand // Doble Engineering Company, Practicing Oil analysis Magazine, Issue. – 2003. – №. 200303. 41. Sherif Ghoneim Diagnostic Tool for Transformer Fault Detection Based on Dissolved Gas Analysis /Sherif Ghoneim, Kamel A. Shoush// Advances in Electrical Engineering Systems (AEES). – 2012. – № 3 – Vol. 1– pp 152– 156; 42. Hasmat Malik Fuzzy-Logic Applications in Transformer Diagnosis Using Individual and Total Dissolved Key Gas Concentrations /Hasmat Malik, R.K. Jarial, H.M. Rai// International Journal of Latest Research in Science and Technology. –2012. –Vol.1. –pp :25-29; 43. Ikb al Abulmageed Hameed. Monitoring Power Transformer Using Fuzzy Logic / Ikb al Abulmageed Hameed, SAHER Rady Farag // Journal of Engineering and Development.–2013.–Vol. 17.–№.6.–pp. 146-163; 44. Gouda O.E. Power Transformer Incipient Faults Diagnosis Based on Dissolved

Gas Analysis /O.E. Gouda, Saber Salem, Salah Hamdy El-Hoshy //TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. – 2016. –№1. – Vol. 17. – pp. 10 – 16; 45. M. Geetha Integrating Fuzzy IEC Expert System based Fault Diagnosis for Power Transformer Using Dissolved Gas Analysis /Geetha M, Jovitha Jerome, Manikandan P. // Journal of Electrical Engineering. – 2014. – № 2. –Vol. 14. – pp. 348–354; 46. Abhishek V. Gedam, A Comparative Analysis of DGA Methods for the Incipient Fault Diagnosis in Power Transformer Using ANN Approach /Abhishek V. Gedam, Prof. P.S.Swami, Dr. Archana Thosar// International Journal of Scientific & Engineering Research.–2015. –Volume 6.– pp. 387-391; 47. Amin Samy. Conventional Ratio and Artificial Intelligence (AI) Diagnostic methods for DGA in Electrical Transformers /Amin Samy, Sayed A. Ward, Mahmud N. Ali// International Electrical Engineering Journal (IEEJ). – 2015.–№12. – Vol. 6. – pp. 2096–2102; 48. Mehrdad Beykverdi. A New Approach for Transformer Incipient Fault Diagnosis Based on Dissolved Gas Analysis (DGA) /Mehrdad Beykverdi, F. Faghihi, and A. MoArefian pour// Nova Explore Publications, Nova Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2014. – Vol. 2 (3). – pp. 1-8; 49. Deherwal T. Study and Diagnosis of Key Gases to Detect the Condition Monitoring Of Oil Immersed Current Transformer / T. Deherwal, R.N. Singh // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). – 2012. – Vol. 2. – Issue 4. – pp. 118– 20; 50. Левин В.М. Статистический метод распознавания дефектов в силовых трансформаторах при техническом обслуживании по состоянию / В.М. Левин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 8 – С. 37 –41; 51. Левин В.М. Диагностика и эксплуатация оборудования электрических сетей. Учебное пособие. Часть 1.– Новосибирск: изд-во НГТУ, 2010 –97 с;

**References:** 1. Shutenko O.V., Abramov V.B., Baklaj D.N. Analiz problem, vznikajushhiih pri interpretacii rezultatov hromatograficheskogo analiza rastvorenyh v masle gazov [An analysis of the problems encountered in interpreting the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. *Vestn. Khar'k. politekh. in-ta. Ser.: Energetika: nadijnist' ta energoeffektivnist'* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Energy reliability and energy efficiency]. Kharkov, 2013, no 59, issue 1032, pp 164–180; 2. Shutenko O.V., Baklaj D.N. Analiz zakonov raspredelenija otoshenij par gazov, rekomenduemyh SOU-N EE 46.501 dlja raspoznavanija tipa defekta v vysokovol'tnyht ransformatorah [Analysis of the distribution laws of relationships couples gases recommended SOU-N EE 46.501 for the defect type detection in high voltage transformer]. *Energetika ta elektrifikacija*. 2013, no 8, pp. 36–47; 3. Shutenko O.V., Baklaj D.N. Analiz zakonov raspredelenija otoshenij par gazov, rekomenduemyh zarubezhnymi metodikami dlja raspoznavanija tipa defektov v vysokovol'tnyht transformatorah [Analysis of the distribution laws of relationships couples gases recommended by foreign techniques for fault type detection in high voltage transformers]. *Svitlotekhnika ta elektroenergetika*. 2013, no №3-4, pp. 68–80; 4. Shutenko O.V., Baklaj D.N., Macievskej A.O. Obosnovanie neobhodimosti korrekcirovki znachenij otoshenij par gazov pri raspoznavanii tipa prognoziruemogo defekta po rezultatam analiza rastvorenyh v masle gazov. [Justification of the need to adjust the values of pairs of gas relations in recognizing the type of defect projected on the analysis of gases dissolved in oil]. *Informatsijntekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya. Tezydopovidye XXIV mizhnarodnoyinaukovo-praktychnoyikonferentsiyi. Ch. 2 (18–20 travnya 2016 r., Kharkiv)* [Information technology: science, engineering, technology, education, health. Abstracts of the XXIV Int. Sci.-Pract. Conf. Part 2 (18–20 May 2016, Kharkov)]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2016, p. 196; 5. Shutenko O.V., Baklaj D.N., Gorzhankina T.G. Analiz grafichnih metodiv rozpoznavannja tipu defektu za rezultatami HARG [Analysis of image recognition methods such defect on the results of DGA]. *Vestn. Khar'k. politekh. in-ta. Ser.: Energetika: nadijnist' ta energoeffektivnist'* Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Energy reliability and energy efficiency]. Kharkov, 2016, no 3, issue 1175, pp. 122–140; 6. SOU-N EE 46.501: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannja za rezultatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih ui zoljacionomu masli [SOU-N EE 46.501: Diagnosis oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gas with gas relay selected, i gases dissolved in insulating oil]. Kiiv, 2007, 92p; 7. RD 153-34.0-46.302-00: Metodi cheskie ukazanja po diagnostike razvivajushhishja defektov trans-

formatornogo oborudovaniya po rezul'tatam hromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenykh v masle. [RD 153-34.0-46.302-00: Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of the chromatographic analysis of gases dissolved in oil]. Moskva: NC JeNAS, 2001, 28 p. **8.** Shutenko O.V., Baklaj D.N., Ostrikova T.A., Mel'nik N.Ju. Analiz dostovernosti raspoznavaniya tipov defektov transformatorov pri ispol'zovanii otноshenij par gazov i graficheskikh obrazov defektov. [Analysis dostovernosti raspoznavaniya typical defects transformers relations with Using steam and gases graphic obrazov defects]. *Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta. Ser.: Energetika: nadiynist' ta energoefektivnist'* [Bulletin of th eKhar'kov Polytechnic Institute. Series: Energy reliability and energy efficiency]. Kharkov, 2013, no 17, issue 990, pp. 178–187; **9.** Snetkova O.V. Opyt diagnostiki maslonapolnennykh vvodov 110-500 kV v OAO «Mosjenergo» [Experience diagnosing oil-filled bushings 110-500 kV in OAO "Mosenergo"]. *Electro*, 2004, no 2, pp. 39–42; **10.** V.I. Komarov, A.N. Lushin, V.N. Osotov, D.N. Prosvirnin O vliyanii masla marki GK na nadjozhnost'j elektrooborudovaniya [The effect of oil grade GK on the reliability of electrical equipment]. *Materialy plenarnogo zasedaniya sojeta «Vysokovol'tnye vvody – sovremennoe sostojanie proizvodstva, jekspluatcii, diagnostirovaniya i remonta», «Obshhie problemy diagnostiki silovogo jelektrooborudovaniya»*. – Istrinskij rajon Moskovskoj oblasti. 2008. Available at: <http://www.myshared.ru/slide/58746>. (accessed: 15.09.2016); **11.** Davidenko I.V. Analizt ehniko-jekonomiceskikh pokazatelej parka jelektrooborudovaniya s pomoshh'ju JEDIS «Al'batros». [Analysis of technical and economic parameters of electric fleet using EDIS "Albatross"]. *Materialy konferencii «Metody i sredstva kontrolya izoljicii vysokovol'tnogo oborudovaniya»*, 2015., Perm'. Available at: <http://dimrus.com/conf2015.html>. (accessed: 13.09.2016); **12.** Mishhenko Je.N., Shinkarenko G.V. Hromatograficheskij kontrol' masla vvodov silovykh transformatorov. [Chromatographic oil control power transformer bushings]. *Jelektricheskie stancii*, 1986, no 3, pp. 64–67; **13.** Sherif S. M. Ghoneim, Ibrahim B. Taha [Artificial Neural Networks for Power Transformers Fault Diagnosis Based on IEC Code Using Dissolved Gas Analysis]. *International journal of control avtomation and systems*. 2015, Vol. 4, no. 2, pp. 18–21; **14.** Mostafa. M. Ibrahim, M. M. Sayed, E. E. Abou El-Zahab [Artificial Intelligence Solution For Incipient Faults Diagnosis Of Oil-Filled Power Transformers]. *Proceeding of Journal of Electric Engineering*. 2015, Vol. 19, no. 4, pp. 1–6; **15.** Ming-Jong Lin [Gaussian distribution Diagnoses in Transformer's Insulating Oil]. *Joint International Mechanical, Electronic and Information Technology Conference (JIMET 2015)*. 2015, Chongqing, China., pp. 824–830; **16.** Mohd Muhridza Bin Yaacob, Ahmed Raisan Hussein, Mohd Fauzi Bin Othman [DGA Method-Based ANFIS Expert System for Diagnosing Faults and Assessing Quality of Power Transformer Insulation Oil]. *Modern Applied Science*. 2016, Vol. 10, no 1, pp. 13–22; **17.** Afiqah R. N., Musirin I., Johari D., Othman M. M., Rahman T. K. A., Othman Z. [Fuzzy Logic Application in DGA Methods to Classify Fault Type in Power Transformer]. *Selected Topics in Power Systems and Remote Sensing*. 2009, pp. 83-88; **18.** Michel Duval [A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2002, Vol. 18, no 3, pp. 8–17; **19.** Dolin A.P., Ponochock Ch., Popovich A. Akusticheskaja lokacijaj elektricheskikh razrjadov v izmeritel'nyh transformatorah [Acoustic location of electrical discharges in instrument transformers]. *Electro*, 2005, no. 2, pp. 27–31; **20.** Ahmed M R., Geliel M.A., Khalil A. [Power transformer Fault Diagnosis using Fuzzy Logic Technique Based on Dissolved Gas Analysis] *21 st Mediterranean Conference on Control&Automation (MED)*, 2013, Plataniyas-Chania, Crete, Greece, pp. 584-589; **21.** Ahmed Raisan Hussein, Yaacob M. M., Othman M. F. [Ann expert system for diagnosing faults and assessing the quality insulation oil of power transformer depending on the DGA method]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2015, Vol. 78, no 2, pp. 278-285; **22.** Inderpreet Kaur, Preetinder Singh [Residual Life assessment with DGA, Furan content in transformer oil and Degree of polymerization of solid insulation]. *International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering*. 2016, Vol. 6, pp. 230–234; **23.** Ryzhkina A.Ju. *Analiz i sovershenstvovanie hroma tograficheskij metodov diagnostiki maslonapolnennogo vysokovol'tnogo jelektrooborudovaniya: avtoref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehn. nauk: 05.14.12 «tehnika vysokih naprjazhenij»* [Analysis and improvement of chromatographic methods of diagnostics of oil-

filled high-voltage electrical equipment. Abstract of a thesis dr. eng. sci. diss. 05.14.12 "High-Voltage Equipment"]. Novosibirsk, 2012. 20 p; **24.** Dar'jan L.A. Interpretacija rezul'tatov hromatograficheskogo analiza gazoobraznykh produktov razlozhenija transformatornykh masel pri vozdejstvii ul'trazvukovoj kavitacii. [Interpretation of the results of the chromatographic analysis of the gaseous products of the decomposition of transformer oil when exposed to ultrasonic cavitation]. *Electro*, 2011, no 1, pp. 29–35; **25.** Hazlee Azil Illias, Xin Rui Chai, Ab Halim Abu Bakar, HazlieMokhlis [Transformer Incipient Fault Prediction Using Combined Artificial Neural Network and Various Particle Swarm Optimisation Techniques]. *PLoS One*. 2015, no 10(6), pp. 1-16; **26.** Sadeq Y. Jasmin, Jyoti Shrivastava [Dissolved gas analysis of power transformers]. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research*. 2013, Vol. 3, Issue 5, pp. 1-102; **27.** Sherif Ghoneim, Nadjim Merabtine. [Early Stage Transformer Fault Detection Based on Expertise Method] *International Journal of Electrical Electronics and Telecommunication Engineering*. 2013, Vol. 44, pp.1289–1294; **28.** Ming-Jong Lin. [A New Approach with Three Dimension Figure and ANSI/IEEE C57.104 Standard Rule Diagnoses Transformer's Insulating Oil]. *Engineering*. 2014, Vol. 6, no 12, pp. 841–848; **29.** Tejeswi Deherwal, Ranjana Nigam Singh [Study and Diagnosis of Key Gases to Detect the Condition Monitoring Of Oil Immersed Current Transformer]. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*. 2012, Vol 2, pp. 118–120; **30.** Xiaohui Wang, Kehe Wu, Yang Xu. [Research on Transformer Fault Diagnosis based on Multi-source Information Fusion]. *International Journal of Control and Automation*. 2014, Vol. 7, no 2, pp. 197-208; **31.** Bojarchukov G.M. Prakticheskie problemy ocenki sostojaniya vysokovol'tnogo oboru-dovaniya po sodержaniju gazov v transformatornom masle. [Practical problems in assessing the state of high-voltage equipment for the gas content in transformer oil]. *Novini energetiki*. 2010, no 10, pp. 24–33; **32.** Kerimkulov N.N., Levin V.M. Razrabotka kriteriev bezavarijnogo jekspluatcii maslonapolnennogo oborudovaniya podstanij. Bajesovskij podhod. [Development of criteria for accident-free operation of oil-filled substation equipment. Bayesian approach]. *Diagnostika jelektricheskikh ustanovok: materialy 10 ob'edinen. nauch.-prakt. seminaru po problemam jekspluatcii, diagnostirovaniya, remonta i prodlenija sroka sluzhby transformatorov*. [Diagnosis of electrical systems: 10 materials combined. scientific-practical. seminar on operation, diagnosis, maintenance and extension of service transformers]. Novosibirsk, 2015, pp. 24–30; **33.** Aksenov Ju.P., Zavidje V.I., Jaroshenko I.V. Ispol'zovanie usovershenstvovannykh metodov jelektromagnitnoj lokacii razrjadnykh javlenij dlja opredelenija ob'ema remonta transformatorov. [Use of improved methods for electromagnetic locating discharge phenomena to determine the amount of repair transformers]. *Electro*, 2004, no 5, pp. 19–24; **34.** Komarov V.I., Davidenko I.V. Analiz prichin povrezhdaemosti i specifika diagnostiki transformatorov do 35 kV. [Analysis of the causes of damage and specificity of the diagnosis of transformers up to 35 kV.]. *Metody i sredstva ocenki sostojaniya jenergeticheskogo oborudovaniya: sb. dokladov «Sovremennoe sostojanie i problemy diagnostirovaniya oborudovaniya jelektricheskikh setej naprjazheniem 6-35 kV»*. Sankt-Peterburg.: PJEIPK. [Methods and assessment of power equipment means: Sat. reports "Current status and problems of diagnosing electrical networks 6-35 kV voltage equipment". - St. Petersburg.: PEIPK], 2008, vol. 31, pp. 44–48; **35.** Aksenov Ju.P. *Monitoring tehničeskogo sostojaniya vysokovol'tnoj izoljicii jelektrooborudovaniya jenergetičeskogo naznachenija v jekspluatcii i pri remontah*. [Technical condition monitoring of high-voltage insulation of electrical energy purposes in the operation and repairs]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., 2002, 338 p; **36.** L. Bouchaoui [Diagnostic des Transformateurs de Puissance par la Méthode d'Analyse des Gaz Dissous: Application des Réseaux de Neurones]. Université Ferhat Abbas Sétif UFAS (ALGERIE), 2010. 155 p; **37.** Wong K. O., Saha T.K. [Expert System for the Fault Diagnosis of Oil-Filled Power Transformer Using Dissolved Gas Analysis]. In: *International Symposium on High Voltage Engineering*. – Indian Institute of Science, 2001, Vol. 5. – pp. 1-4.; **38.** Ian .A.R. Gray [Practical Experience Gained from Dissolved Gas Analysis at an Aluminium Smelter]. *Doble Eskom Annual International Conference, Southern Africa*. – 2010; **39.** Analiz koncentracii gazov v masle vvodov transformatora [Analysis of the gases in the oil transformer bushings. Available at: <http://energetik22.ru/analiz-koncentracii-gazov-v-masle-vvodov-transformatora> (accessed: 10.08.2016); **40.** Lewand L. [Using dissolved gas analysis to detect active faults in oil-insulated electrical



equipment]. *Doble Engineering Company, Practicing Oil analysis Magazine*. 2003, no 200303; **41**. Sherif Ghoneim, Kamel A. Shoush [Diagnostic Tool for Transformer Fault Detection Based on Dissolved Gas Analysis]. *Advances in Electrical Engineering Systems (AEES)*. 2012, Vol. 1, no 3, pp 152–156; **42**. Hasmat Malik, Jarial R.K., Rai H.M. [Fuzzy-Logic Applications in Transformer Diagnosis Using Individual and Total Dissolved Key Gas Concentrations]. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*. 2012, Vol. 1, pp :25-29; **43**. Ikb al Abulmageed Hameed, SAHER Rady Farag. [Monitoring Power Transformer Using Fuzzy Logic]. *Journal of Engineering and Development*. 2013, Vol. 17, no 6, pp. 146-163; **44**. Gouda O.E., Saber Salem, Salah Hamdy El-Hoshy. [Power Transformer Incipient Faults Diagnosis Based on Dissolved Gas Analysis]. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2016, Vol. 17, no 1, pp. 10–16; **45**. Geetha M, Jovitha Jerome, Manikandan P. [Integrating Fuzzy IEC Expert System based Fault Diagnosis for Power Transformer Using Dissolved Gas Analysis] *Journal of Electrical Engineering*. 2014, Vol. 14, no 2, pp. 348–354; **46**. Abhishek V. Gedam, Swami P.S., Archana Thosar. [A Comparative Analysis of DGA Methods for the Incipient Fault Diagnosis in Power Transform-

er Using ANN Approach]. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2015, Vol. 6, pp. 387-391; **47**. Amin Samy, Sayed A. Ward, Mahmud N. Ali. [Conventional Ratio and Artificial Intelligence (AI) Diagnostic methods for DGA in Electrical Transformers]. *International Electrical Engineering Journal*. 2015, Vol. 6, no 12, pp. 2096–2102; **48**. Mehrdad Beykverdi, Faghihi F., MoArefian pour A. [A New Approach for Transformer Incipient Fault Diagnosis Based on Dissolved Gas Analysis (DGA)]. *Nova Explore Publications, Nova Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014, Vol. 3, no2, pp. 1-8; **49**. Deherwal T., Singh R.N. [Study and Diagnosis of Key Gases to Detect the Condition Monitoring Of Oil Immersed Current Transformer]. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*. 2012, Vol. 2, Issue 4, pp. 118–20; **50**. Levin V.M. Statisticheskij metod raspoznavanija defektov v silovyh transformatorah pri tehničeskom obsluzhivanii po sostojaniju [Statistical defect detection method in the power transformers for maintenance as]. *Promyshlennaja jenergetika*. 2013, no 8, pp. 37–41; **51**. Levin V. M. *Diagnostika i jekspluatacija oborudovanija jektricheskikh setej*. [Diagnosis and operation of electric network equipment]. Novosibirsk: NGTU Publ. 2010, 97 p;

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Аналіз графічних зразків побудованих за результатами хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів для високовольтних силових трансформаторів з різними типами дефектів / О. В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 31 (1235). – С. 97 – 121. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Анализ графических образцов построенных по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов для высоковольтных силовых трансформаторов с различными типами дефектов / Шутенко О. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 31 (1235). – С. 97 – 121. Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Analysis of graphical samples of gases constructed for chromatographic analysis of gases dissolved in oil for high-voltage power transformers with various types of defects / O. V. Shutenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1235). – P. 97 – 121. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.**

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

**Шутенко Олег** Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Передача електричної енергії», тел.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

**Шутенко Олег** Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический Университет „Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Передача электрической энергии», тел.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

**Shutenko Oleg Volodimirovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of «Electric power transmission», tel.: (057)707-66-43; e-mail: o.v.shutenko@gmail.com.

УДК 33.013.6

Ю.М. Маєра

**ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ, ЩО ДОЗВОЛЯЮТЬ ПРОВОДИТИ СПАЛЮВАННЯ НИЗЬКОКАЛОРИЙНИХ ТПВ БЕЗ ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОГО ПАЛИВА**

Досліджено умови спалювання низькокалорійного ТПВ в залежності від теплоти згорання ТПВ, коефіцієнта витрати повітря і температури підігріву повітря. Для умов сміттєспалювального заводу «Енергія» отримано набір рівнянь регресії, що дозволяють для заданих значень будь-яких двох з названих чинників визначити значення третього, при якому досягається раціональний рівень температури в топці. Це дозволяє визначити умови, за яких можливе спалювання ТПВ без використання додаткового палива.

**Ключові слова:** ТПВ, теплота згорання, коефіцієнт витрати повітря, температурний рівень в топці, температура підігріву повітря.

Изучены условия сжигания низкокалорийного ТБО в зависимости от теплоты сгорания ТБО, коэффициента расхода воздуха и температуры подогрева воздуха. Для условий мусоросжигающего завода «Энергия» получен набор уравнений регрессии, позволяющих для заданных значений любых двух из названных факторов определить значение третьего, при котором достигается рациональный уровень температуры в топке. Это позволяет определять условия, при которых возможно сжигание ТБО без использования дополнительного топлива.

**Ключевые слова:** ТБО, теплота сгорания, коэффициент расхода воздуха, температурный уровень в топке, температура подогрева воздуха.

**Conditions of incineration of low-calorific solid wastes were studied depending on the heat of combustion of solid waste, the airflow factor and the air heating temperature. For the conditions of the incineration plant "Energia", a set of regression equations has been obtained, allowing for the given values of any two of the named factors to determine the value of the third, at which a rational temperature level in the furnace is reached. This allows to determine the conditions under which MSW can be burned down without using additional fuel.**

**Keywords:** MSW, heating value, coefficient of air flow rate, temperature level in the furnace, air heating temperature.

**Вступ**

За останні десятиріччя технологія спалювання ТПВ в світі досягла значного розповсюдження. Завдяки її динамічному розвитку сьогодні акцент ставиться не просто на утилізацію ТПВ, а на виробництво електроенергії та теплоти в рамках ТЕЦ на ТПВ [1-2].

В умовах України на реалізацію технології спалювання ТПВ накладається ряд істотних особливостей, пов'язаних з низькою і нестабільною теплотою згорання ТПВ [2]. При цьому, цілком імовірно, що іноземні розробки в галузі технології спалювання ТПВ не будуть в повній мірі задовольняти українські реалії. Для поширення цієї технології необхідні власні теоретичні та конструкторські розробки.

**Аналіз стану питання**

При зміні теплоти згорання вихідного ТПВ може з'явитися необхідність в спалюванні додаткового висококалорійного палива (звичай, природного газу) [3], що істотно погіршує техніко-економічні показники підприємства зі спалювання ТПВ.

За результатами аналізу, проведеного з використанням технічних, технологічних, екологічних і соціально-економічних критеріїв, показано, що для українських умов спалювання в шарових топках практично несорттованих ТПВ з мінімальною їх підготовкою є найбільш доцільним і економічно обґрунтованим способом термічної утилізації ТПВ як нині, так і на доступну для огляду перспективу. Водночас відомі розробки в області забезпечення заданих екологічних параметрів спалювання ТПВ [4-7] можуть бути перенесені на

українські умови.

Значний науково-практичний інтерес має дослідження роботи обладнання зі спалювання ТПВ в не розрахункових умовах. Однією з найбільших проблем при спалюванні ТПВ в Україні є низькі значення теплоти згорання. При зміні теплоти згорання вхідного ТПВ може з'явитися необхідність в спалюванні додаткового висококалорійного палива (звичай, природного газу), що істотно погіршує техніко-економічні показники підприємства зі спалювання ТПВ і тому на практиці дуже важливо визначити технологічні та конструктивні параметри, що дозволяють навіть при роботі з низькими теплотами згорання ТПВ, мінімізувати витрати природного газу або забезпечити стійке горіння навіть без його використання. Але при цьому необхідно забезпечити температурний рівень в топці, що спалює ТПВ, на раціональному рівні порядку 850°C.

**Мета дослідження**

Проведені дослідження ставили за мету визначити умови, що дозволяють проводити спалювання низькокалорійного ТПВ без використання додаткового палива.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

– для умов сміттєспалювального заводу «Енергія» (м. Київ) отримано набір рівнянь регресії, що дозволяють визначити набір значень факторів, які чинять найбільший вплив на температурний рівень в топці, при якому буде досягнутий раціональний рівень температури в топковому просторі;

– за допомогою методів математичної статистики обґрунтовано адекватність отриманих рівнянь регресії.

© Ю.М. Маєра, 2017

### Методи дослідження

Для досліджень використана розрахункова модель, представлена набором розрахункових залежностей, що відображають інтегральні матеріальні та енергетичні баланси для окремих етапів процесу, і відпрацьованим механізмом обміну даними між цими розрахунковими блоками [8]. При цьому структура розрахункових блоків представлена залежностями, що узгоджуються з базовими положеннями теорії горіння [9, 10].

Основним завданням розрахункової моделі є дослідження теплових аспектів спалювання ТПВ в топці шляхом побудови теплового балансу. Створена модель передбачає можливість вивчення спалювання як окремо ТПВ, так і ТПВ спільно з природним газом. Тому розрахункова модель представлена чотирма блоками: матеріальний баланс горіння ТПВ, матеріальний баланс горіння природного газу, матеріальний баланс спільного горіння ТПВ та природного газу, теплової баланс процесу. В даній роботі при використанні розрахункової моделі розглядається випадок спалювання лише ТПВ. При цьому в результаті проведення чисельних експериментів підбирається такий набір значень основних факторів, при якому досягається заданий температурний рівень в топці 850 °С.

#### Методика встановлення рівнянь регресії

Згідно даних роботи [8] в якості основних факторів, що впливають на температурний рівень в топці, що спалює ТПВ, при заданому тепловому навантаженні котла є теплота згоряння ТПВ  $Q_{np}$ , коефіцієнт витрати повітря  $\alpha$  та температура підігріву повітря  $t_n$ .

Отже мова йде про існування наступної залежності:

$$t_d = f(Q_{np}, \alpha, t_n, k_{nnp}).$$

На практиці дозволений діапазон температурного рівня в топці є досить обмеженим і в якості раціонального значення приймається  $t_d=850^\circ\text{C}$ . Пірометричний коефіцієнт  $k_{nnp}$  залежить від конструкції топки та режиму експлуатації. При адаптації створеної розрахункової моделі до умов сміттєспалювального заводу «Енергія» був отриманий діапазон зміни  $k_{nnp}$ , що становить від 0,735 (для номінального режиму експлуатації) до 0,9 (для мінімальної сталої потужності).

Науковий та практичний інтерес становить пошук залежностей наступного типу:

$$Q_{np} = f_1(\alpha, t_n); \quad \alpha = f_2(Q_{np}, t_n);$$

$$t_n = f_3(Q_{np}, \alpha).$$

Залежності будуються таким чином, щоб при комбінаціях  $Q_{np}$ ,  $\alpha$ ,  $t_n$  отримувати температурний рівень в топці 850 °С. Ці залежності треба отримати для різних навантажень топки, що буде враховано за допомогою значення  $k_{nnp}$ . В цій роботі обрано два значення  $k_{nnp}$  для яких отримані рівняння регресії: 0,735 та 0,9. В повній мірі отримані рівняння відповідатимуть конструкції топки заводу «Енергія», але оскільки вона є досить типовою, вони зможуть з деякою умовністю використовуватися для інших

топок спалювання ТПВ, що мають подібну конструкцію.

Для конструювання шуканих залежностей в кожному випадку використано алгоритм:

– обрано комбінації значень аргументів, які охоплюють важливі для практики діапазони зміни відповідних технологічних параметрів;

– для обраних комбінацій аргументів за допомогою розрахункової моделі ітераційним методом отримано значення величин, обраних в якості функцій, таких щоб температурний рівень в топці склав 850 °С;

– отримані дані у вигляді масиву значень функції та матриці комбінацій аргументів спільно оброблено за допомогою методів математичної статистики в середовищі сучасного інженерно-обчислювального пакету в результаті чого отримано відповідні рівняння регресії.

#### Перевірка адекватності отриманих рівнянь регресії

Перевірку адекватності всіх отриманих рівнянь регресії виконано стандартним чином:

– 1. Знайдено дисперсію адекватності

$$S_{ad}^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / f_{ad},$$

де  $n$  – кількість комбінацій аргументів, яким за допомогою розрахункової моделі співставлень значення шуканої величини;

$y_i$  – значення шуканої величини отримане за допомогою розрахункової моделі (з точки зору побудови рівняння регресії  $y_i$  є експериментальним значенням);

$\hat{y}_i$  – значення шуканої величини отримане за допомогою рівняння регресії;

$f_{ad} = n - l$  – кількість ступенів свободи;

$l$  – кількість коефіцієнтів рівняння регресії (для всіх отриманих в цьому розділі рівнянь регресії  $l=6$ );

– 2. Знайдено дисперсію відтворюваності

$$S_g^2 = (\Delta y_{пред} / 2)^2,$$

де  $\Delta y_{пред}$  – межове значення абсолютної похибки визначення шуканої величини за допомогою ітераційної процедури розрахункової моделі;

– 3. Обчислено розрахункове значення критерію Фішера  $F = S_{ad}^2 / S_g^2$ ;

– 4. Обрано відповідне табличне значення критерію Фішера для довірчої ймовірності 0,955  $F_{\alpha}(f_{ad}, f_g)$ , де  $f_g$  – число ступенів свободи для дисперсії відтворюваності. В даному випадку оскільки паралельні досліди з отримання шуканої величини за допомогою розрахункової моделі не проводились  $f_g$  прийнято рівним  $\infty$ ;

– 5. Зіставлено значення розрахункового та табличного значень критерію Фішера.

#### Результати дослідження

Використовуючи розроблену методику встановлено у вигляді рівнянь регресії вирази, що описують взаємну залежність основних факторів, що

впливають на температурний рівень в топці при заданому тепловому навантаженні котла.

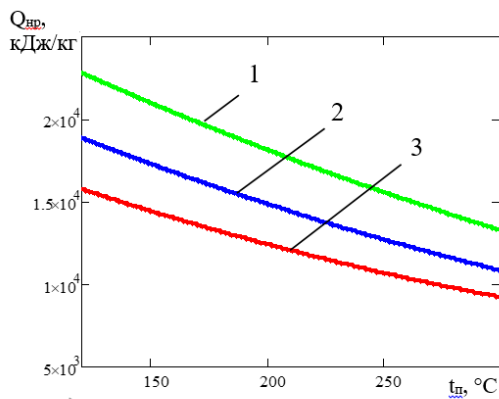
Залежність необхідної теплоти згоряння ТПВ (кДж/кг) для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для заданих значень коефіцієнту витрати повітря та температури підігріву повітря:

– для значення  $k_{\text{пир}}=0,735$

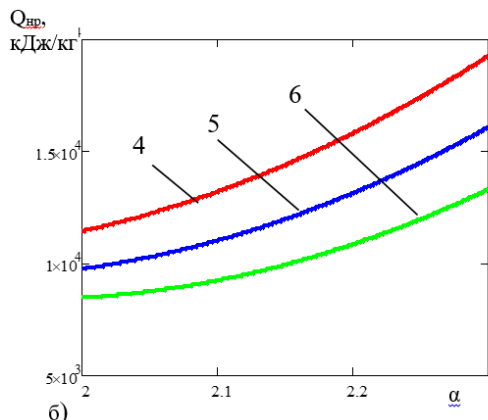
$$Q_{\text{нр}} = -130800 - 82,673 \cdot \alpha \cdot t_n + 0,055 \cdot t_n^2 + 114,244 \cdot t_n - 140300 \cdot \alpha + 42140 \cdot \alpha^2$$

Рівняння справедливе для  $2 \leq \alpha \leq 2,3$  та  $120 \leq t_n \leq 320^\circ\text{C}$ .

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1 – Графічна інтерпретація залежності  $Q_{\text{нр}} = f_1(\alpha, t_n)$  для значення  $k_{\text{пир}}=0,735$

а) для фіксованих значень коефіцієнту витрати повітря 1 –  $\alpha=2,3$ ; 2 –  $\alpha=2,2$ ; 3 –  $\alpha=2,1$ ;

б) для фіксованих значень температури підігріву повітря 4 –  $t_n=180^\circ\text{C}$ , 5 –  $t_n=240^\circ\text{C}$ , 6 –  $t_n=300^\circ\text{C}$

– для значення  $k_{\text{пир}}=0,9$

$$Q_{\text{нр}} = -6533 - 40,431 \cdot \alpha \cdot t_n + 0,041 \cdot t_n^2 + 51,159 \cdot t_n + 991,214 \cdot \alpha + 3422 \cdot \alpha^2$$

Рівняння справедливе для  $2 \leq \alpha \leq 2,33$  та  $20 \leq t_n \leq 340^\circ\text{C}$ .

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис. 2.

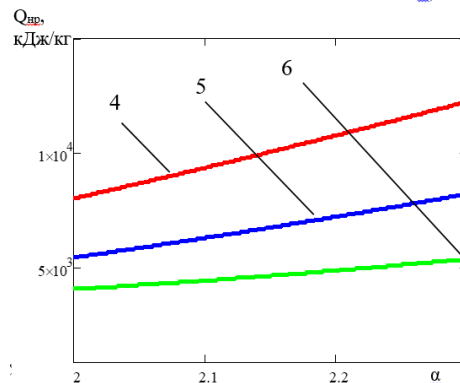
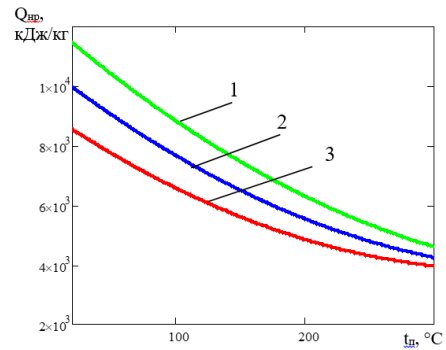


Рис. 2 – Графічна інтерпретація залежності  $Q_{\text{нр}} = f_1(\alpha, t_n)$  для значення  $k_{\text{пир}}=0,9$

а) для фіксованих значень коефіцієнту витрати повітря 1 –  $\alpha=2,2$ ; 2 –  $\alpha=2,1$ ; 3 –  $\alpha=2$ ;

б) для фіксованих значень температури підігріву повітря 4 –  $t_n=40^\circ\text{C}$ , 5 –  $t_n=160^\circ\text{C}$ , 6 –  $t_n=280^\circ\text{C}$

Залежність необхідної температури підігріву ТПВ ( $^\circ\text{C}$ ) для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для заданих значень коефіцієнту витрати повітря та теплоти згоряння ТПВ:

– для значення  $k_{\text{пир}}=0,735$

$$t_n = -765,491 + 0,018 \cdot \alpha \cdot Q_{\text{нр}} - 2,229 \cdot 10^{-8} \cdot Q_{\text{нр}}^2 - 0,071 \cdot Q_{\text{нр}} + 1071 \cdot \alpha - 193,75 \cdot \alpha^2$$

Рівняння справедливе для  $2 \leq \alpha \leq 2,3$  та  $7000 \leq Q_{\text{нр}} \leq 12000$  кДж/кг.

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис. 3.

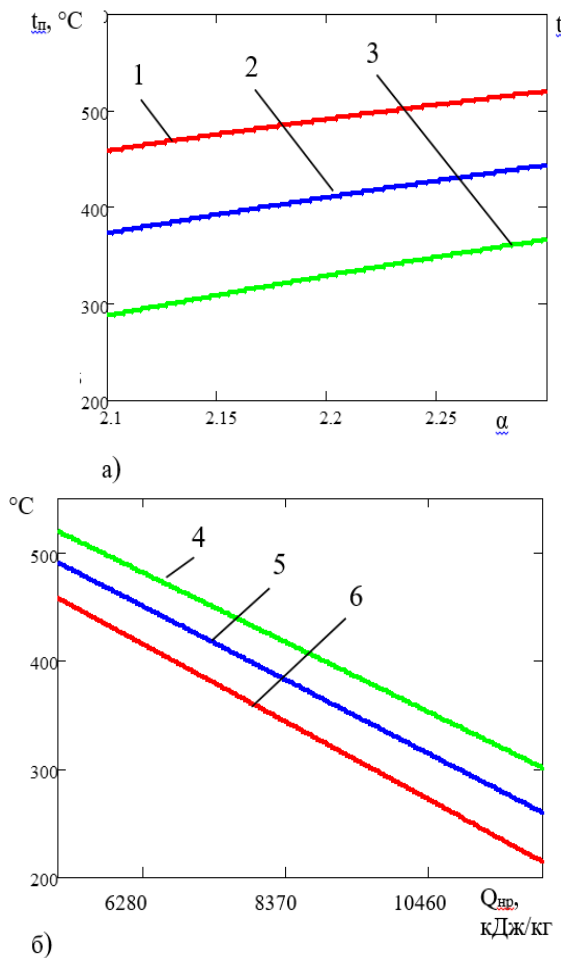


Рис. 3 – Графічна інтерпретація залежності  $t_n = f_2(Q_{np}, \alpha)$  для значення  $k_{np}=0.735$   
 а) для фіксованих значень теплоти згоряння ТПВ, кДж/кг  
 1 –  $Q_{np}=5000$ , 2 –  $Q_{np}=7500$ , 3 –  $Q_{np}=10000$ ;  
 б) для фіксованих значень коефіцієнту витрати повітря 4 –  $\alpha=2,3$ , 5 –  $\alpha=2,2$ , 6 –  $\alpha=2,1$

– для значення  $k_{np}=0,9$

$$t_n = -1086 + 0.022 \cdot \alpha \cdot Q_{np} + 4.402 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{np}^2 - 0.155 \cdot Q_{np} + 1398 \cdot \alpha - 266.667 \cdot \alpha^2$$

Рівняння справедливе для  $2,1 \leq \alpha \leq 2,3$  та  $5000 \leq Q_{np} \leq 9500$  кДж/кг.

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис. 4.

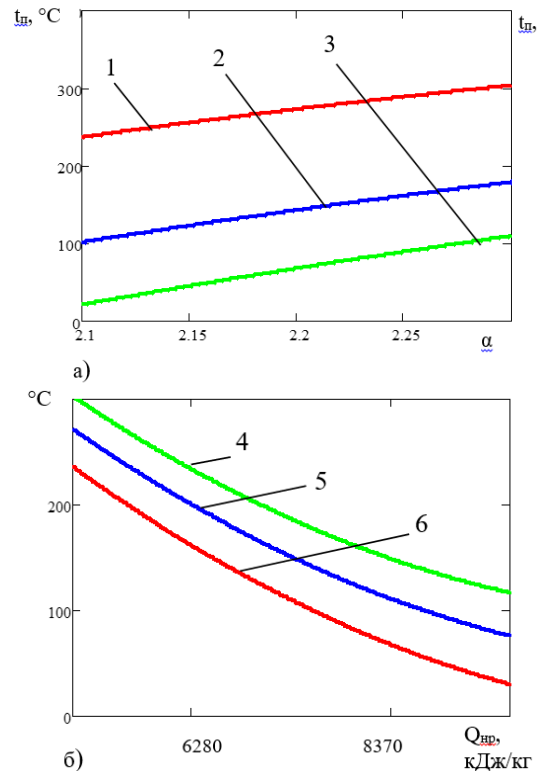


Рис. 4 – Графічна інтерпретація залежності  $t_n = f_2(Q_{np}, \alpha)$  для значення  $k_{np}=0.9$

а) для фіксованих значень теплоти згоряння ТПВ, кДж/кг  
 1 –  $Q_{np}=5000$ , 2 –  $Q_{np}=7500$ , 3 –  $Q_{np}=10000$ ;  
 б) для фіксованих значень коефіцієнту витрати повітря 4 –  $\alpha=2,3$ , 5 –  $\alpha=2,2$ , 6 –  $\alpha=2,1$

Залежність необхідного коефіцієнту витрати повітря для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для заданих значень коефіцієнту температури підігріву повітря та теплоти згоряння ТПВ:

– для значення  $k_{np}=0,735$

$$\alpha = 1,04 + 7,107 \cdot 10^{-8} \cdot Q_{np} \cdot t_n + 4,013 \cdot 10^{-10} \cdot Q_{np}^2 + 5,28 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{np} + 4,647 \cdot 10^{-4} \cdot t_n + 1,9 \cdot 10^{-6} \cdot t_n^2$$

Рівняння справедливе для  $20 \leq t_n \leq 320^\circ C$  та  $7000 \leq Q_{np} \leq 12000$  кДж/кг.

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис. 5.

– для значення  $k_{np}=0.9$

$$\alpha = 0,825 + 1,279 \cdot 10^{-7} \cdot Q_{np} \cdot t_n - 6,546 \cdot 10^{-9} \cdot Q_{np}^2 + 1,916 \cdot 10^{-4} \cdot Q_{np} + 5,038 \cdot 10^{-4} \cdot t_n + 3,781 \cdot 10^{-6} \cdot t_n^2$$

Рівняння справедливе для  $20 \leq t_n \leq 320^\circ C$  та  $5000 \leq Q_{np} \leq 12000$  кДж/кг.

Графічну інтерпретацію рівняння представлено на рис. 6.

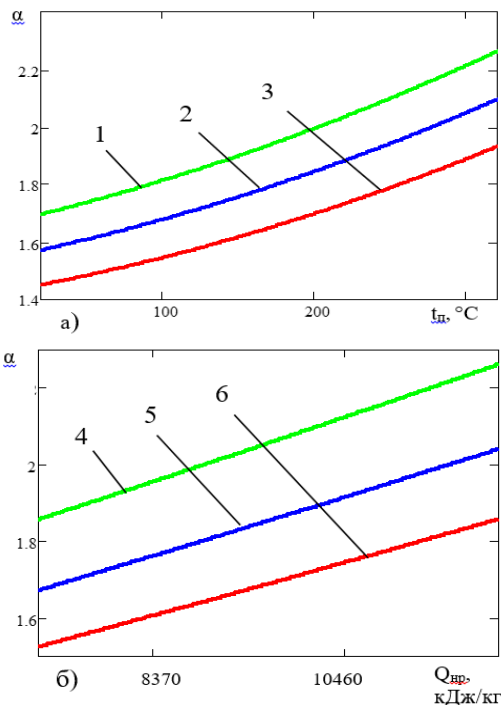


Рис. 5 – Графічна інтерпретація залежності  $\alpha = f_3(t_n, Q_{np})$  для значення  $k_{npr}=0.735$

- а) для фіксованих значень теплоти згоряння ТПВ, кДж/кг  
 1 –  $Q_{np}=11000$ , 2 –  $Q_{np}=9000$ , 3 –  $Q_{np}=7000$ ;  
 б) для фіксованих значень температури підігріву повітря, °С  
 4 –  $t_n=280$ , 5 –  $t_n=180$ , 6 –  $t_n=80$

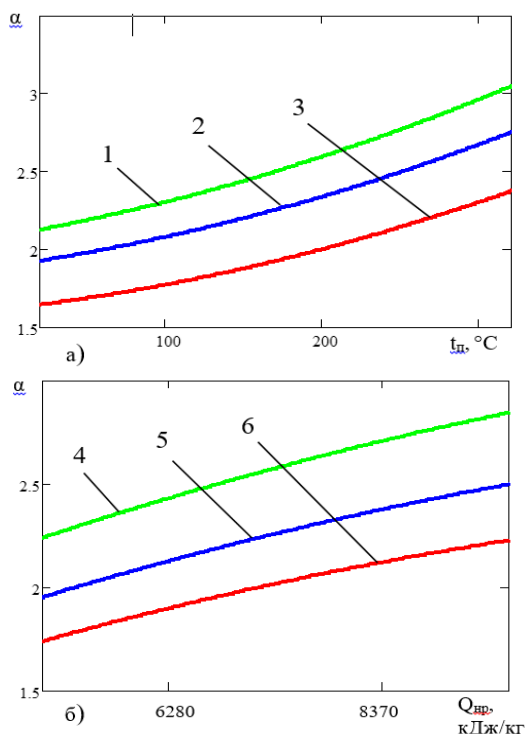


Рис. 6 – Графічна інтерпретація залежності  $\alpha = f_3(t_n, Q_{np})$  для значення  $k_{npr}=0.9$

- а) для фіксованих значень теплоти згоряння ТПВ, кДж/кг  
 1 –  $Q_{np}=10000$ , 2 –  $Q_{np}=7500$ , 3 –  $Q_{np}=5000$ ;  
 б) для фіксованих значень температури підігріву повітря, °С  
 4 –  $t_n=280$ , 5 –  $t_n=180$ , 6 –  $t_n=80$

Для всіх отриманих рівнянь регресії виконується умова  $F < F_\alpha$ , тобто з точки зору математичної статистики всі отримані рівняння є адекватними. Аналіз отриманих рівнянь та їх графічної інтерпретації також свідчить про їх відповідність логіці протікання процесу – при номінальному тепловому навантаженні котла, що спалює ТПВ, а отже й топки ( $k_{npr}=0,735$ ) умови підтримання заданого температурного рівня в топці є більш важкими, тобто за інших рівних умов необхідно мати більші значення теплоти згоряння ТПВ, або менші значення коефіцієнтів витрати повітря, або більші значення температури підігріву повітря.

За допомогою отриманих рівнянь зручно визначати умови, за яких є можливість проводити процес спалювання ТПВ без використання додаткового палива. Цей науковий інструментарій є корисним як на стадії проектування обладнання для спалювання ТПВ та попереднього складання технологічних карт, так і в якості основи алгоритму, на базі якого можна проводити автоматичне керування процесом.

#### Висновки

Отримано дві серії рівнянь регресії для номінального теплового навантаження котла, що спалює ТПВ, ( $k_{npr}=0,735$ ) та сталого зниженого навантаження ( $k_{npr}=0,9$ ), які встановлюють залежності необхідної теплоти згоряння ТПВ для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для заданих значень коефіцієнту витрати повітря та температури підігріву повітря; необхідної температури підігріву ТПВ для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для заданих значень коефіцієнту витрати повітря та теплоти згоряння ТПВ; необхідного коефіцієнту витрати повітря для забезпечення необхідного температурного рівня в топці для заданих значень температури підігріву повітря та теплоти згоряння ТПВ. Адекватність отриманих рівнянь регресії обґрунтовано за допомогою методів математичної статистики.

Отримані рівняння є корисним інструментом для визначення умов роботи топки, за яких є можливість проводити процес спалювання ТПВ без використання додаткового палива.

#### Список літератури:

1. Тугов, А.Н. Опыт США в области использования энергетического потенциала твердых бытовых отходов [Текст] / А.Н. Тугов, Ю.В. Вихрев // Энергетик. – 2009. – № 11. – С. 25-29. Магера, Ю.М. Концепция развития «Завода «Энергия»: ТЭЦ на ТБО [Текст] / Ю.М. Магера // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: Сборник трудов Института промышленной экологии. – К.: ИПЦ Алкон НАН Украины, 2016. – С. 208-211.
2. Komilis, D. Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram [Текст] / D. Komilis, K. Kissas, A. Symeonidis // Waste Management. – 2014. – Volume 34, Issue 2. – pp. 249-255.
3. Liu, A. A review of municipal solid waste environmental standards with a focus on incinerator residues [Текст] / Alic Liu, Fei Ren, Wenlin Yvonne and others // International Journal of Sustainable Built Environment. – 2015. – Volume 4, Issue 2. – pp. 165-188.
4. Warnatz, J. Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation [Текст] / J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble. – Springer, 2006. – 378 p.
5. Miller, J.A. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion [Текст] / J.A. Miller, C.T. Bow-

man // Progress in Energy and Combustion Science. – Elsevier, 1989. – Vol. 15, no. 4. – P. 287–338. 6. Konnov, A.A. NO<sub>x</sub> Formation, Control and Reduction Techniques (англ.) Handbook of Combustion. Volume 2: Combustion Diagnostics and Pollutants [Текст] / A.A. Konnov, M.T. Javed, H. Kassman, N. Irfan. – Wiley, 2010. – P. 439–464. 7. Магера, Ю.М. Создание расчетной модели процессов сжигания твердых бытовых отходов [Текст] / Ю.М. Магера // Промышленная теплотехника.–т.38.–№6.– С. 51-59. 8. Enkhjargal, Kh. Mathematical modeling of the heat treatment and combustion of a coal particle. Volatile escape stage [Текст] / Kh. Enkhjargal, V. V. Salomatov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics May 2011. – Volume 84. – Issue 3. – pp. 638–647. 10. Бирюков, А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое топливо : учеб. пособ. для вузов [Текст] / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.Е. Рубан; ГВУЗ «ДонНТУ». – Донецк: Изд-во «Ноулидж». Донецкое отд-ние, 2014. – 232 с.

## Bibliography (transliterated):

1. Tugov, A.N., Vihrev, Ju. V. (2009). Opyt SSHa v oblasti ispol'zovaniya jenergeticheskogo potentsiala tverdyh bytovykh othodov. Jenergetik, 11, 25-29. 2. Magera, Ju. M. (2016). Konceptija razvitiya «Zavoda «Jenergija»: TJeC na TBO. Problemy jekologii i jekspluacii obektov jenergetiki: Sbornik trudov Instituta promyshlennoj jekologii.– K.: IPC Alkon NAN Ukrainy, 208-211. 3. Komilis, D., Kissas, K., Symeonidis, A. (2014). Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram. Waste Management, 34, 2, 249-255. 4. Liu, A., Ren, F., Yvonne, W.

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Визначення умов, що дозволяють проводити спалювання низькокалорійних ТПВ без використання додаткового палива / Ю. М. Магера // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 123 – 127. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Определение условий, что позволяют проводить сжигание низькокалорійних ТБО без использования дополнительного топлива/ Ю. М. Магера // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – No 31 (1253). – С. 123 – 127. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2224-0349.**

**Determination of the conditions for combustion of low calorific SHO without the use of additional fuel / Y. M. Magera // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 31 (1253). – P. 123 – 127. Bibliogr.: 5. – ISSN 2224-0349.**

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

**Магера Юрій Михайлович** – аспірант ІТТФ НАН України, м. Київ; тел.: (044) 456-62-82; e-mail: YMMagera@gmail.com.

**Магера Юрій Михайлович** - аспірант ІТТФ НАН України, м. Київ; тел.: (044) 456-62-82; e-mail: YMMagera@gmail.com.

**Magera Yuriy** – postgraduate student of IETP NAS Ukraine, tel: +380444566282; e-mail: [YMMagera@gmail.com](mailto:YMMagera@gmail.com)

## ЗМІСТ

<b>А. Л. Азарнов, К. В. Безручко, В. И. Лазненко, С. В. Синченко, А. А. Харченко</b> Экспресс-диагностика электрохимических аккумуляторов энергоустановок подвижных объектов .....	<b>3</b>
<b>О. В. Голик, С. Ю. Антоненко, Л. А. Щербенюк, В. М. Золотарьов</b> Технологічний контроль дефектів в емальпроводах з поліімідною ізоляцією .....	<b>12</b>
<b>О.Г. Гриб, А.А. Зуєв, С.Ю. Шевченко, С.В. Швець, Т.С. Ієрусалімова, О.В. Бортніков</b> Використання безпілотних літальних апаратів для безпеки функціонування ліній електропередачі .....	<b>19</b>
<b>А. Г. Гурин, І. О. Костюков, Є. С. Москвітін, В. П. Скібін, Ю. Г. Гонтар</b> Неруйнівний метод визначення неоднорідностей в ізоляційному матеріалі лінійних ізоляторів та силових кабелів .....	<b>25</b>
<b>Г. А. Сендерович, А. В. Дяченко</b> Анализ изменения кривой напряжения в узлах общего присоединения электрической сети .....	<b>29</b>
<b>С. Ф. Жуков, А. І. Важинський</b> Адаптивна система керування електротехнічним комплексом .....	<b>35</b>
<b>О. А. Загайнова, Г. М. Сердюкова</b> Аналіз змін показників якості ізоляції високовольтних вводів протягом тривалої експлуатації .....	<b>40</b>
<b>О.П. Лазуренко, М.М. Кругол</b> Моделювання режиму роботи групи мережевих насосів при роботі ТЕЦ по тепловому графіку навантаження в літній період .....	<b>46</b>
<b>І. А. Мирчук, Г. В. Безпрозваних</b> Обґрунтування оптимальної тривало дозвільної температури сучасних полімерних ізоляційних композицій суднових кабелів .....	<b>53</b>
<b>С. О. Федорчук</b> Використання акумуляції енергії для оптимізації режиму роботи відновлювальних джерел енергії у енергосистемі .....	<b>59</b>
<b>А. С. Федяй</b> Проходные емкости в кабелях с экранированными витыми парами .....	<b>64</b>
<b>І. І. Червоненко В. С. Кулешов, К. В. Кулешова</b> Використання гібридних енергогенеруючих вузлів в «розумних» мережах .....	<b>69</b>
<b>О. В. Чулєєва, В. М. Золотарьов</b> Полімерні композиції на основі кополімеру етилену з вінілацетатом. Вплив магнетитів на показники горючості .....	<b>74</b>
<b>С. Ю. Шевченко, Д. О. Данильченко, О. М. Равлик</b> Аналіз можливості створення фізичної моделі вражаємості лінії електропередавання прямими ударами блискавки .....	<b>78</b>
<b>С. Ю. Шевченко, С. І. Дривецький</b> Дослідження форми і величини наведених перенапруг, що виникають повітряних лініях з захищеними проводами, при ударах блискавки поблизу ліній .....	<b>83</b>
<b>Д. А. Шокарьов, В. О. Чорна, К. П. Богодист</b> Економічне обґрунтування встановлення сонячних модулів в приватному домогосподарстві .....	<b>87</b>
<b>Е. Д. Шумілова, Ю. М. Шумілов</b> До питання енергозбереження та підвищення електробезпеки в мережах 6-10 кВ .....	<b>93</b>
<b>О. В. Шутенко</b> Аналіз графічних зразків побудованих за результатами хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів для високовольтних силових трансформаторів з різними типами дефектів .....	<b>97</b>
<b>Ю. М. Маєра</b> Визначення умов, що дозволяють проводити спалювання низькокалорійних ТПВ без використання додаткового палива .....	<b>122</b>



## CONTENTS

<b>A. L. Azarnov, K. V. Bezruchko, V. I. Laznenko, S. V. Sinchenko, A. A. Kharchenko</b> Rapid diagnosis of electrochemical batteries power plants moving objects .....	<b>3</b>
<b>O. V. Golik, S. Y. Antonets, L. A. Scheveniuk, V. V. Zolotarjov</b> Technological monitoring of defects in enameled wire with poliimid isolation .....	<b>12</b>
<b>O.G. Gryb, , A.A. Zuev, S.Yu. Shevchenko S.V. Shvets, T.S. Iierusalimova, A.V. Bortnikov</b> The use of unmanned aerial vehicles for the safe functioning of transmission lines .....	<b>19</b>
<b>A. G. Gurin, I. A. Kostiukov, E. S. Moskvitin, V. P. Skibin</b> A non-destructive method for heteroganity determination in insulation material .....	<b>25</b>
<b>G. A. Senderovich, A. V. Diachenko</b> Analysis of change of a curve of tension in clusters of the common accession of an electrical network .....	<b>29</b>
<b>S. F. Zhukov, A. I. Vazhinsky</b> Adaptive control system of electrical equipment .....	<b>35</b>
<b>A. A. Zagaynova, G. N. Serdyukova</b> Analysis of changes in insulation quality indicators of high-voltage bushings of during long-term operation .....	<b>40</b>
<b>O. P. Lasurenko, M. M. Kruhoh</b> Simulation of the operation of the group of network pumps at the operation of the CHPP on the thermal load schedule in the summer period .....	<b>46</b>
<b>I. A. Mirchuk, G. V. Bezprozvannykh</b> The substitution of the optimum long term operating temperature of modern polymer insulating composition of ship cables .....	<b>53</b>
<b>S. O. Fedorchuk</b> Using the accumulation of energy to optimize the treatment of renewable energy in the grid .....	<b>59</b>
<b>H. S. Fedyay.</b> Feedthrough capacitance in cables with shielded twisted pairs .....	<b>64</b>
<b>I. I. Chervonenko, K. V. Kuleshova, V. S. Kuleshov</b> Using hybrid power generating units in «smart» networks .....	<b>69</b>
<b>O.V. Chulieieva, V.M. Zolotaryov</b> Polymer compositions based ethylene vinyl acetate copolymer. Influence magnesite on the combustibility performance .....	<b>74</b>
<b>S. Y. Shevchenko, D. O. Danylenko, A. M. Ravlik</b> Analysis of possible creation of physical models affection transmittion power lines direct lightning strike .....	<b>78</b>
<b>S. Y. Shevchenko, S. I. Drivetskiy</b> Research of form and size of the pointed protected wires, from shots of lightning near by lines .....	<b>83</b>
<b>D. Shokarov, V. Chorna, K. Bogodist</b> Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household .....	<b>87</b>
<b>E. D. Shumilova, Y. N. Shumilov</b> To the question of energy saving and increase electrical safety in network 6-10 kV .....	<b>93</b>
<b>O. V. Shutenko</b> Analysis of graphical samples of gases constructed for chromatographic analysis of gases dissolved in oil for high-voltage power transformers with various types of defects .....	<b>97</b>
<b>Y. M. Magera</b> Determination of the conditions for combustion of low calorific SHO without the use of additional fuel .....	<b>122</b>

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХПІ»**

**Збірник наукових праць**

Серія:  
Енергетика: надійність та енергоефективність

№ 31 (1253) 2017

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. А. Г. Гурін  
Технічний редактор асистент С. О. Федорчук

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».  
Кафедра ЕІКТ  
Тел.: (0572) 707-63-80; e-mail: majonima@gmail.com

Обл.-вид № 53–13.

Підп. до друку 17.11.2017 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний. Riso-друк.  
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 15,1. Наклад 300 прим. 1й з-д 1-50  
Зам. № 179. Ціна договірна.

---

Видавець і виготовлювач  
Видавничий центр НТУ «ХПІ».  
вул. Кіричова 2, м. Харків, 61002  
Свідотство суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

---